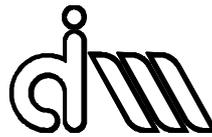


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

“MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE
SISTEMAS CON CATALIZADOR Y TRAMPA DE PARTÍCULAS
MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS (ANSYS APDL Y WORKBENCH)”

*Presentado por: D. “Juan José Molina Campoverde”
Dirigido por: Dr. D. “Francisco David Denia Guzmán”*

Valencia, septiembre de 2021

Agradecimientos

A mis padres y a mi hermano que pese a las dificultades suscitadas durante la pandemia logramos salir adelante, brindándome apoyo y motivación incondicional, siendo un pilar fundamental durante toda mi formación.

A mi tutor el Dr. Francisco David Denia Guzmán por la dirección y contribución de los conocimientos brindados tanto en las clases como en el trabajo de Fin de Máster quien ha sido de gran contribución en este proyecto.

RESUMEN

El Trabajo de Fin de Máster se centra en el estudio de la modelización del comportamiento acústico de sistemas con catalizador y trampa de partículas en la línea de escape de un motor de combustión interna alternativo. Dicha modelización se basa en la aplicación del método de los elementos finitos que permite determinar las prestaciones de atenuación sonora de dispositivos postratamiento con monolitos (catalizador y filtro de partículas), así como realizar un estudio paramétrico detallado mediante la modificación de propiedades en los monolitos, configuraciones de geometría, presencia de hollín y la variación de la resistividad. Para ello, se ha utilizado el software comercial ANSYS en sus versiones APDL y WORKBENCH, y se han desarrollado e implementado las metodologías asociadas, con una descripción detallada de las macros y menús correspondientes.

El estudio se basa en un modelo de propagación 3D/1D en tres geometrías de interés: circular, rectangular y elíptica. Las cámaras y los conductos del sistema se estudian como un modelo de propagación 3D mientras que los monolitos del catalizador y la trampa de partículas se representan con un modelo de propagación 1D desde el punto de vista acústico. Las propiedades de los monolitos se reemplazan por una matriz de transferencia la cual relaciona las propiedades de entrada y salida de los puertos del monolito.

La validación del estudio se realiza mediante el cálculo del índice de la pérdida de transmisión (TL) al comparar los resultados de múltiples casos de estudio obtenidos tanto en ANSYS APDL como ANSYS WORKBENCH. Al determinar la prestación acústica del sistema de escape se obtiene un error inferior al 1% en todos los casos de estudio realizados.

En base a los resultados obtenidos, se plantea como posible trabajo futuro el estudio del comportamiento acústico de la línea de escape con su disposición completa incluyendo catalizador y trampa de partículas más silenciadores, así como analizar la influencia de la temperatura en el campo acústico en condiciones normales de funcionamiento de los motores de combustión interna alternativos.

Palabras claves: monolito, catalizador, filtro de partículas, DPF, ANSYS APDL, ANSYS WORKBENCH, método de los elementos finitos, pérdida de transmisión, TL.

RESUM

El Treball de Fi de Màster se centra en l'estudi de la modelització del comportament acústic de sistemes amb catalitzador i trampa de partícules en la línia d'escapament d'un motor de combustió interna alternatiu. Aquesta modelització es basa en l'aplicació del mètode dels elements finits que permet determinar les prestacions d'atenuació sonora de dispositius posttractament amb monòlits (catalitzador i filtre de partícules), així com realitzar un estudi paramètric detallat mitjançant la modificació de propietats en els monòlits, configuracions de geometria, presència de sutge i la variació de la resistivitat. Per a això, s'ha utilitzat el programa comercial ANSYS en les seues versions APDL i WORKBENCH, i s'han desenvolupat i implementat les metodologies associades, amb una descripció detallada de les macros i menús corresponents.

L'estudi es basa en un model de propagació 3D/1D en tres geometries d'interès: circular, rectangular i el·líptica. Les càmeres i els conductes del sistema s'estudien com un model de propagació 3D mentre que els monòlits del catalitzador i el filtre de partícules es representen amb un model de propagació 1D des del punt de vista acústic. Les propietats dels monòlits es reemplacen per una matriu de transferència la qual relaciona les propietats d'entrada i eixida dels ports del monòlit.

La validació de l'estudi es realitza mitjançant el càlcul de l'índex de la pèrdua de transmissió (TL), comparant els resultats de múltiples casos d'estudi obtinguts tant en ANSYS APDL com ANSYS WORKBENCH. Al determinar la prestació acústica del sistema d'escapament s'obté un error inferior al 1% en tots els casos d'estudi realitzats.

En base als resultats obtinguts, es planteja com a possible treball futur l'estudi del comportament acústic de la línia d'escapament amb la seua disposició completa incloent catalitzador i trampa de partícules més silenciadors, així com analitzar la influència de la temperatura en el camp acústic en condicions normals de funcionament dels motors de combustió interna alternatius.

Paraules Clau: monòlit, catalitzador, filtre de partícules, DPF, ANSYS APDL, ANSYS WORKBENCH, mètode dels elements finits, pèrdua de transmissió, TL.

ABSTRACT

This Master's Thesis focuses on the study and the modelling of the acoustic behavior of systems with catalytic converters and particulate filters in the exhaust line of a reciprocating internal combustion engine. For this purpose, the application of the finite element method is used to determine the sound attenuation performance of after-treatment devices with monoliths (catalyst and particulate filter). In addition, a parametric study is carried out by modifying the properties of the monoliths and the geometrical configurations, as well as by considering soot presence and resistivity variation. In this work, the commercial software ANSYS in its APDL and WORKBENCH versions has been used. The associated methodologies have been developed and implemented, with a detailed description with these corresponding macros, windows and menus.

The study is based on a 3D/1D propagation model in three geometries of interest: circular, rectangular, and elliptical. The chambers and ducts of the system are studied as a 3D propagation model while the monoliths of the catalyst and the particulate filter are represented with a 1D propagation model from the acoustic point of view. The properties of the monoliths are replaced by a transfer matrix which relates the input and output properties of the monolith ports.

The validation of the study is performed by calculating the transmission loss (TL) index and by comparing the results of multiple case studies obtained in both ANSYS APDL and ANSYS WORKBENCH. The acoustic performance of the exhaust system has an error smaller than 1%.

Based on the results obtained, the study of the exhaust line with its complete layout including catalytic converter and particulate filter plus silencers is considered as a possible future work, as well as analyzing the influence of temperature on the acoustic field under normal operating conditions of reciprocating internal combustion engines.

Key Words: monolith, catalyst, particulate filter, DPF, ANSYS APDL, ANSYS WORKBENCH, finite element method, transmission loss, TL.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO	1
1.1. OBJETO DEL TRABAJO	1
1.2. ALCANCE DEL TRABAJO.....	1
1.3. MOTIVACIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES DEL TRABAJO	2
2.1. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	2
2.2. ANTECEDENTES DEL TRABAJO	2
3. ACÚSTICA DE LA LÍNEA DE ESCAPE	3
3.1. CONTROL DE RUIDO.....	3
3.1.1 NIVELES SONOROS: DECIBELIOS	4
3.2. EL CATALIZADOR	4
3.3. TRAMPA DE PARTÍCULAS	5
3.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE ACÚSTICA.....	6
3.4.1. PRINCIPIO FÍSICO DEL MODELO DE ONDAS	6
3.4.2. TIPOS DE ONDAS.....	7
3.4.3. ONDAS PROGRESIVAS, REGRESIVAS Y ESTACIONARIAS.....	7
3.5. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS A LOS MODELOS ACÚSTICOS: CATALIZADOR Y TRAMPA DE PARTÍCULAS (DPF)	7
3.5.1. MODELO 3D Y MODELO 1D: CATALIZADOR	8
3.5.2. MODELO 3D Y MODELO 1D: TRAMPA DE PARTÍCULAS (DPF).....	13
3.5.2.1. MODELO 1D DPF.....	13
3.5.2.2. SECCIÓN (II) DEL FILTRO DPF	13
4. METODOLOGÍA DE TRABAJO MEDIANTE ANSYS APDL Y ANSYS WORKBENCH.....	19
4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
5. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN ANSYS.....	21
5.1. ANSYS APDL.....	21
5.2. ANSYS WORKBENCH	26
5.2.1. ENGINEERING DATA (PROPIEDADES DEL MATERIAL)	27
5.2.2. GEOMETRY (GEOMETRÍA)	28
5.2.3. MODEL (MALLADO)	28
5.2.4. SETUP (CONDICIONES DE CONTORNO).....	31
5.2.5. SOLUTION (SOLUCIÓN).....	35
5.2.6. RESULTS (RESULTADOS)	36
5.3. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	37

6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
6.1.	INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA CON CONDUCTOS CENTRADOS FRENTE A CONDUCTOS DESCENTRADOS	46
6.2.	INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA RESISTIVIDAD EN CONDUCTOS CENTRADOS SIN LA PRESENCIA DE HOLLÍN	49
6.3.	INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA RESISTIVIDAD EN CONDUCTOS CENTRADOS CON LA PRESENCIA DE HOLLÍN	51
6.4.	INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA RESISTIVIDAD EN CONDUCTOS DESCENTRADOS CON LA PRESENCIA DE HOLLÍN	53
6.5.	INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA LONGITUD EN CONDUCTOS CENTRADOS SIN LA PRESENCIA DE HOLLÍN	55
6.6.	INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA LONGITUD EN CONDUCTOS DESCENTRADOS SIN LA PRESENCIA DE HOLLÍN	57
6.7.	INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA LONGITUD EN CONDUCTOS DESCENTRADOS CON LA PRESENCIA DE HOLLÍN	59
7.	CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	61
7.1.	CONCLUSIONES	61
7.2.	DESARROLLOS FUTUROS	63
8.	BIBLIOGRAFÍA	64
9.	PLANOS	66
10.	ANEXOS	72
10.1.	ANEXO 1: FICHERO DE MATLAB PARA LAS PROPIEDADES DEL CATALIZADOR 72	
10.2.	ANEXO 2: FICHEROS DE MATLAB PARA LAS PROPIEDADES DEL FILTRO DE PARTÍCULAS	76
10.3.	ANEXO 3: MACRO DE APDL PARA LA GEOMETRÍA CENTRADA	83
10.4.	ANEXO 4: MACRO DE APDL PARA LA GEOMETRÍA DESCENTRADA	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mallado de geometrías en WORKBENCH	31
Tabla 2. Mallado de geometrías en APDL.....	37
Tabla 3. Error calculado para cada caso de estudio	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Niveles de intensidad sonora [dB].....	3
Figura 2: Constitución del catalizador [3].....	5
Figura 3: Constitución de un filtro de partículas DPF [10].	6
Figura 4: Longitud de onda.....	6
Figura 5: Modelo 3D de los conductos / 1D monolito del catalizador [15].	8
Figura 6: Sección longitudinal del filtro de trampa de partículas [10].....	13
Figura 7: Comportamiento del fluido en el filtro de partículas [10].	14
Figura 8: Metodología de trabajo.....	19
Figura 9: Partes de la geometría.....	20
Figura 10: Macros de estudio.	21
Figura 11: Ventana de configuración de ANSYS APDL.....	22
Figura 12: Interface ANSYS APDL.....	22
Figura 13: Definición de constantes de estudio.	23
Figura 14: Lectura de propiedades del monolito del catalizador.....	23
Figura 15: Lectura de propiedades del monolito del DPF.	23
Figura 16: Parámetros de la geometría.....	24
Figura 17: Área principal [izq.] y mallado [der.].	24
Figura 18: Copia del área principal [izq.] y mallado del modelo [der.] de la geometría circular centrada.....	25
Figura 19: Asignación de propiedades en el puerto del catalizador [izq.] y puerto de DPF [der.].	25
Figura 20: Asignación de propiedades de entrada y salida del modelo.....	26
Figura 21: Pérdida de transmisión TL.	26
Figura 22: Interface ANSYS WORKBENCH.	27
Figura 23: Estudio del análisis de acústica armónica.	27
Figura 24: Propiedades del aire.....	27
Figura 25: Geometría Circular Centrada en Space Claim.	28
Figura 26: Opciones de extrusión.....	28
Figura 27: Detalles mallado Multizona [izq.] asignación de aristas en el sólido [der.]. .	29

Figura 28: Propiedades de mallado en las caras.	29
Figura 29: Opciones de mallado.	30
Figura 30: Mallado de la geometría circular centrada.	30
Figura 31: Asignación de propiedades al sólido.	31
Figura 32: Región acústica.	32
Figura 33: Asignación de puertos de entrada y salida en los monolitos del catalizador [izq.] y DPF [der.].	32
Figura 34: Definición de la matriz de admitancia para el monolito del catalizador.	33
Figura 35: Definición del puerto de entrada [izq.] y salida [der.] de la geometría.	33
Figura 36: Caras asignadas de la pared rígida.	34
Figura 37: Definición de la excitación acústica al modelo.	34
Figura 38: Conductos de entrada y salida de tipo anecoico.	35
Figura 39: Configuración de ajustes del análisis.	35
Figura 40: Detalles del análisis.	36
Figura 41: Etapas completadas.	36
Figura 42: Resultado del cálculo.	36
Figura 43: Resultados obtenidos de TL en ANSYS APDL [izq.] y WORKBENCH [der.].	38
Figura 44: Comparación de resultados ANSYS APDL y WORKBENCH sobre la geometría circular.	38
Figura 45: Comparación de resultados ANSYS APDL y WORKBENCH sobre la geometría rectangular.	39
Figura 46: Comparación de resultados ANSYS APDL y WORKBENCH sobre la geometría elíptica.	39
Figura 47: Comparación de la geometría circular sobre la influencia del descentrado.	46
Figura 48: Comparación de la geometría rectangular sobre la influencia del descentrado.	47
Figura 49: Comparación de la geometría elíptica sobre la influencia del descentrado.	47
Figura 50: Comparación de la geometría circular sobre el aumento de la resistividad.	49
Figura 51: Comparación de la geometría rectangular sobre el aumento de la resistividad.	50
Figura 52: Comparación de la geometría elíptica sobre el aumento de la resistividad.	50

Figura 53: Comparación de la geometría circular sobre aumento de la resistividad y la presencia del hollín.....	51
Figura 54: Comparación de la geometría rectangular sobre aumento de la resistividad y la presencia del hollín.....	52
Figura 55: Comparación de la geometría elíptica sobre aumento de la resistividad y la presencia del hollín.....	52
Figura 56: Comparación de la geometría circular sobre aumento de la resistividad, la presencia del hollín y el descentrado de conductos.	53
Figura 57: Comparación de la geometría rectangular sobre aumento de la resistividad, la presencia del hollín y el descentrado de conductos.	54
Figura 58: Comparación de la geometría elíptica sobre aumento de la resistividad, la presencia del hollín y el descentrado de conductos.	54
Figura 59: Comparación de la geometría circular centrada sobre el aumento de la longitud en los monolitos.	55
Figura 60: Comparación de la geometría rectangular centrada sobre el aumento de la longitud en los monolitos.	56
Figura 61: Comparación de la geometría elíptica centrada sobre el aumento de la longitud en los monolitos.	56
Figura 62: Comparación de la geometría circular con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos.....	57
Figura 63: Comparación de la geometría rectangular con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos.....	58
Figura 64: Comparación de la geometría elíptica con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos.....	58
Figura 65: Comparación de la geometría circular con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos con presencia de hollín.	59
Figura 66: Comparación de la geometría rectangular con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos con presencia de hollín.	60
Figura 67: Comparación de la geometría elíptica con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos con presencia de hollín.	60

1. OBJETO Y ALCANCE DEL TRABAJO

1.1.OBJETO DEL TRABAJO

En el presente Trabajo Fin de Máster se modeliza el comportamiento acústico de sistemas con catalizador y trampa de partículas de la línea de escape de un motor de combustión interna alternativo mediante el método de elementos finitos por medio del software comercial ANSYS APDL Y WORKBENCH a través del estudio de la pérdida de transmisión TL.

1.2.ALCANCE DEL TRABAJO

Para modelizar el comportamiento acústico por medio del software ANSYS se plantean diversas características tanto a los monolitos de catalizador como al del filtro de partículas DPF. El estudio se centra en la modificación parámetros en cuanto a la configuración de modelos geométricos, la variación de longitud de los monolitos, la influencia en la presencia de hollín y el incremento de la resistividad a través de la aplicación del método de los elementos finitos tanto en ANSYS APDL como en WORKBENCH en su versión 2021 R2. Para validar los resultados obtenidos en estudio se comparan los resultados obtenidos de la pérdida de presión TL para cada caso de estudio. Las propiedades de los monolitos y macros se han generado mediante el programa Matlab® proporcionadas por el Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales de la UPV para la realización del proyecto.

1.3.MOTIVACIÓN

El aumento de la contaminación acústica producida por los motores de combustión interna alternativos perjudica desmesuradamente a la salud de las personas en general como consecuencia la pérdida de audición y el estrés. Con los conocimientos adquiridos en asignaturas como acústica y control de ruido, vibraciones mecánicas y diseño asistido por ordenador mediante el método de los elementos finitos se fomenta el estudio para el análisis de problemas sociales y ambientales con lo que se pretende obtener soluciones técnicas frente a la problemática presentada.

2. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES DEL TRABAJO

2.1.JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

El incremento de las emisiones contaminantes producidas por los motores de combustión interna [1] y por ende la contaminación acústica que genera en su funcionamiento al presentar ruido con niveles excesivos pueden ser perjudiciales para la salud de las personas [2]. Por lo tanto, el Departamento de investigación de Ingeniería Mecánica y Materiales de la UPV se ha visto en la necesidad de la implementación de metodologías las cuales permitan determinar el comportamiento acústico de las líneas de escape mediante técnicas de modelado, cálculo numérico y analítico con énfasis en técnicas computacionales [3].

Las tareas de investigación llevadas a cabo se basan en el estudio con un modelo de ondas tridimensionales en los conductos de entrada y de salida del sistema catalizador mientras que en los monolitos se estudia a través de un modelo de una dimensión, por lo que en la línea de escape de los MCI los monolitos del catalizador como el del filtro de partículas DPF presentan gran influencia en la atenuación del comportamiento acústico con lo que se establece un modelo de ondas 3D/1D.

2.2.ANTECEDENTES DEL TRABAJO

El uso de técnicas computacionales ha proporcionado buenos resultados al departamento de investigación en cuanto a las aplicaciones en sistemas de catalizador y filtro de partículas por separado mediante softwares con el método de elementos finitos como Comsol Multiphysics, Synoise e incluso en ANSYS.

Aplicando metodologías para determinar el comportamiento acústico de dispositivos con monolitos en la línea de escape de motores de combustión interna y comparando resultados numéricos como experimentales en cuanto a estudios acústicos se ha notado resultados eficientes en trabajos anteriores [4] [5] [6]. En los últimos años se ha visto que los resultados proporcionados por el software ANSYS consiguen una mejor aproximación de resultados en relación a otros programas al ser comparados con la parte experimental, además de su buena relación de precisión de cálculo frente al coste computacional.

3. ACÚSTICA DE LA LÍNEA DE ESCAPE

3.1. CONTROL DE RUIDO

El sonido es producido por una perturbación de presión que se propaga en un medio elástico comprimible como el aire, producidos por el movimiento de vibración de un cuerpo sonoro. Debido a que el ruido se puede considerar como un sonido molesto y no deseado puede generar efectos contraproducentes a la salud tanto a nivel psicológico como fisiológico de las personas, un ejemplo claro es la pérdida auditiva además de problemas respiratorios y aceleraciones cardíacas por los altos niveles de ruido. [7]

Frente a estas consideraciones se han establecido normativas sobre la contaminación acústica la cuales establecen límites para el control y la emisión de ruido.

En la Figura 1 se presenta el umbral de niveles de intensidad sonora que generan ciertas actividades con el efecto en los humanos frente a su exposición

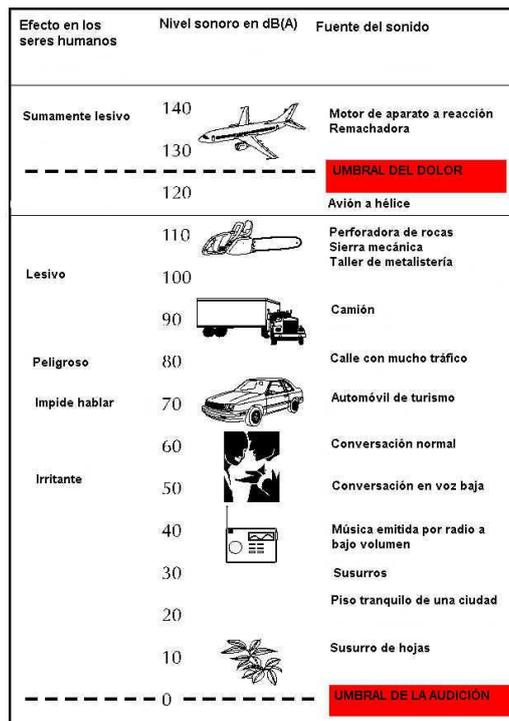


Figura 1: Niveles de intensidad sonora [dB]¹.

1

http://liceu.uab.es/~joaquim/phonetics/fon_percept/psicoacustica/psicoacustica.html

visto el 09/08/2021

3.1.1 NIVELES SONOROS: DECIBELIOS

Para cuantificar el rango de presiones en las que el oído humano es capaz de percibir el sonido se utiliza una escala logarítmica debido que al presentar unos valores como mínimo de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa y como máximo de 20 Pa resulta un rango muy extenso, por lo cual se utiliza una escala logarítmica cuya unidad de medida es del decibelio (dB), con lo que se consigue comprimir y a la vez caracterizar los valores de niveles sonoros en un rango más manejable [8]. A continuación, se presenta sus definiciones:

- Nivel de intensidad sonora:

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_{ref}}\right) \text{ (dB)} \quad I_{ref} = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

- Nivel de potencia sonora:

$$L_W = 10 \cdot \log\left(\frac{Pot}{Pot_{ref}}\right) \text{ (dB)} \quad Pot_{ref} = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

- Nivel de presión sonora:

$$L_P = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{eff}}{P_{ref}}\right)^2 = 20 \cdot \log\left(\frac{P_{eff}}{P_{ref}}\right) \text{ (dB)} \quad I_{ref} = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

La escala logarítmica en la cual el oído humano es capaz de percibir niveles sonoros va entre los 0 y 120 dB, una vez sobrepasado estos valores el oído humano se ve afectado por lesiones e incluso causando así la pérdida de la audición.

3.2. EL CATALIZADOR

El catalizador es un dispositivo instalado en el tubo de escape en los motores de combustión interna alternativos (MCIA) el cual permite reducir las emisiones contaminantes de los gases nocivos del motor a la salida del escape. El catalizador trabaja eficientemente cuando aprovecha las altas temperaturas de los gases de escape de entre 300 a 800 °C para realizar un proceso de catálisis.

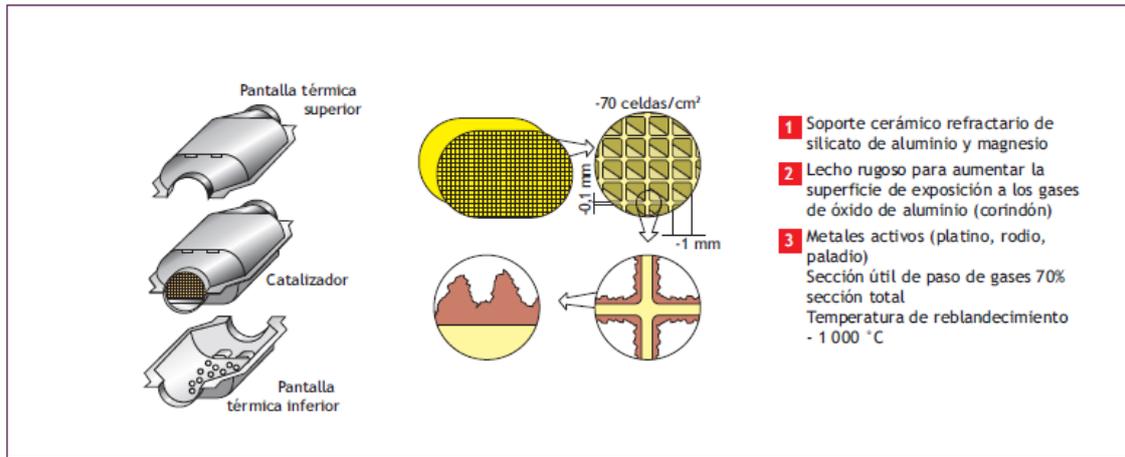


Figura 2: Constitución del catalizador [3].

En la superficie del catalizador se encuentra impregnada con una resina que contiene elementos nobles metálicos, entre ellos el paladio (Pd) y el platino (Pt), los encargados de realizar el proceso de oxidación, además el rodio (Rh) es el encargado de realizar el proceso de reducción, los metales preciosos nombrados trabajan como elementos activos en el catalizador lo cuales permiten iniciar y acelerar las reacciones químicas con otras sustancias tanto al encontrarse en contacto como sin participar en las reacciones [9].

3.3. TRAMPA DE PARTÍCULAS

Debido al aumento de los motores diésel en el mercado y las emisiones contaminantes que estos producen, en especial por las partículas de hollín, se ha optado por reducir esas partículas con el uso de una trampa de partículas que se encarga de filtrar y combustionar el hollín para su posterior eliminación.

El filtro de partículas, también conocido como "*diesel particulate filter*" (DPF), a diferencia del catalizador permite la regeneración de gases del escape a lo largo del funcionamiento del motor. El motor durante su funcionamiento llena el DPF y para prevenir la saturación del mismo se aplica el proceso de regeneración, el cual consiste en que se inyecte combustible posteriormente de la inyección principal con lo que se consigue eliminar el hollín por medio de su combustión generando una oxidación junto a los gases de escape permitiendo así un flujo nuevo de gases y facilitando la salida de estos gases al exterior [9].

El flujo ingresa al monolito del DPF por un conducto, considerando que el orificio de entrada como el de salida no se encuentran coincidentes. El conducto de entrada presenta una cierta longitud y al final del conducto se encuentra tapado, con lo que se consigue que el flujo se encuentre en contacto con las paredes del tubo aprovechando la permeabilidad y porosidad a lo largo del conducto se consigue un intercambio de partículas [10].

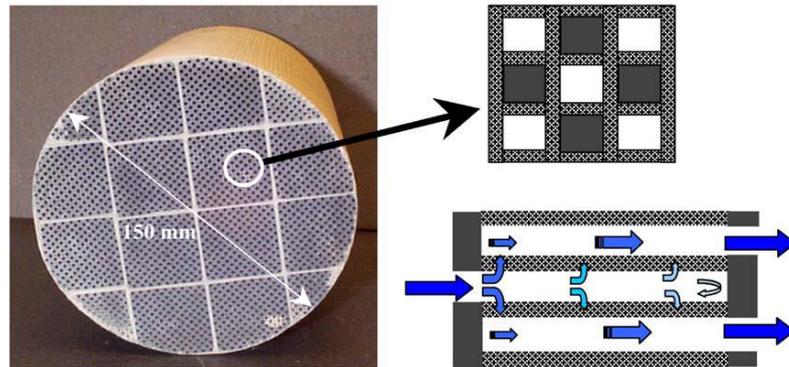


Figura 3: Constitución de un filtro de partículas DPF [10].

3.4.FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE ACÚSTICA

3.4.1. PRINCIPIO FÍSICO DEL MODELO DE ONDAS

El sonido que se produce en una fuente es provocado por una perturbación de presión en un medio elástico, en el cual se puede comprimir, como consecuencia los átomos empiezan a vibrar hasta que la energía desaparezca. A continuación, se presenta el modelo de longitud de onda.

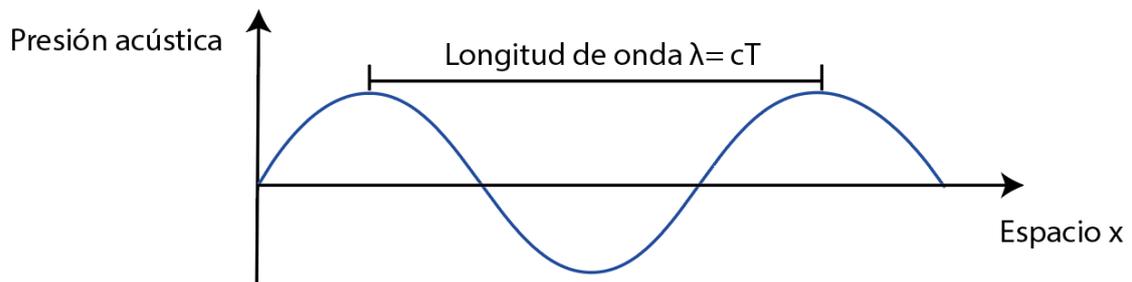


Figura 4: Longitud de onda.

Donde

λ = Longitud de onda

c = Velocidad de propagación

$$T = \text{Periodo} = \frac{1}{f}$$

$f = \text{Frecuencia}$

3.4.2. TIPOS DE ONDAS

Las ondas en función del movimiento de sus partículas pueden ser clasificadas como:

Ondas longitudinales: La dirección en la que se desplazan las partículas en torno a la posición en equilibrio conserva la misma dirección de propagación de la onda.

Ondas transversales: La dirección en la que se desplazan las partículas en torno a la posición en equilibrio es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

3.4.3. ONDAS PROGRESIVAS, REGRESIVAS Y ESTACIONARIAS

- **Ondas progresivas,** La onda se propaga en el sentido creciente de la coordenada espacial y se define en función de f:

$$f(c t - x) \tag{4}$$

- **Ondas regresivas,** La onda se propaga en el sentido decreciente de la coordenada espacial y se define en función de g:

$$g(c t + x) \tag{5}$$

3.5.APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS A LOS MODELOS ACÚSTICOS: CATALIZADOR Y TRAMPA DE PARTÍCULAS (DPF)

El comportamiento acústico tanto del catalizador como la trampa de partículas se aplica a un problema de ecuación de ondas en el cual los conductos de entrada como salida se modelan como conductos 3D, por otra parte, la región de los monolitos se aplica un modelo 1D [11].

3.5.1. MODELO 3D Y MODELO 1D: CATALIZADOR

La caracterización del monolito se emplea a partir de una matriz de transferencia la cual se encarga de relacionar “nodo a nodo” tanto la superficie de entrada como la de la salida del monolito [12] [13] [14] . Se consideran diferentes propiedades tanto para el catalizador como para la trampa de partículas (DPF) por lo cual el cálculo se realiza por separado.

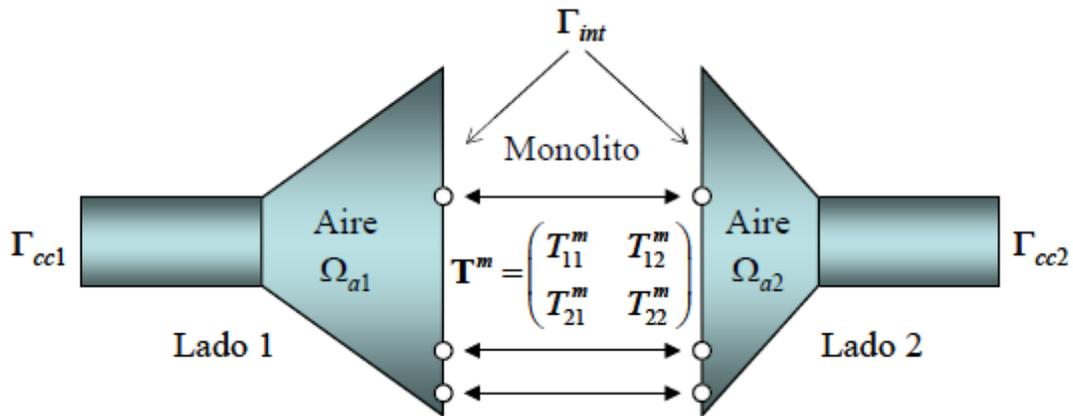


Figura 5: Modelo 3D de los conductos / 1D monolito del catalizador [15].

La propagación del sonido tanto en las regiones de entrada como en la salida se rige mediante la ecuación de Helmholtz el cual caracteriza su comportamiento [14].

$$\nabla^2 P_a + k_0^2 \cdot P_a = 0 \quad (6)$$

En el interior del elemento el (aire) y N (Vector de función de forma) el método de elementos finitos establece que puede interpolarse como:

$$P_a = N \tilde{P}_a^e \quad (7)$$

Al aplicar la formulación de Galerkin en conjunto con el método de los residuos ponderados, se consigue en ambas regiones de aire, separar el monolito en Extremo 1 y Extremo 2:

- Extremo 1:

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \left(\int_{\Omega_{a1}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a1}^e} N^T N d\Omega \right) \tilde{P}_{a1}^e = \quad (8)$$

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} d\Gamma + \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{be1}} N^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} d\Gamma$$

- Extremo 2:

$$\sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \left(\int_{\Omega_{a2}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a2}^e} N^T N d\Omega \right) \tilde{P}_{a2}^e = \quad (9)$$

$$\sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} d\Gamma + \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{be2}} N^T \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} d\Gamma$$

La región en donde se encuentra situada el monolito es reemplazada por una matriz de transferencia de 4 polos como se indica en la Figura 5, esta matriz relaciona los campos acústicos de velocidad y presión conectando ambos extremos del monolito:

$$P_{a1} = T_{11}^m \cdot P_{a2} - T_{12}^m \left(-\frac{1}{j \omega \rho_0} \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} \right) \quad (10)$$

$$-\frac{1}{j \omega \rho_0} \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} = T_{21}^m \cdot P_{a2} - T_{22}^m \left(-\frac{1}{j \omega \rho_0} \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} \right) \quad (11)$$

Incluyendo la ecuación (10),

$$\frac{\partial P_{a2}}{\partial n} = \frac{j \omega \rho_0}{T_{12}^m} P_{a1} - \frac{j \omega \rho_0 T_{11}^m}{T_{12}^m} P_{a2} = j \omega \Pi_{21} P_{a1} - j \omega \Pi_{22} P_{a2} \quad (12)$$

Uniendo las ecuaciones (10) y (12), se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} &= -j \omega \Pi_{21} T_{12}^m P_{a1} + j \omega (\Pi_{22} T_{22}^m - \rho_0 T_{21}^m) P_{a2} \\ &= j \omega \Pi_{11} P_{a1} - j \omega \Pi_{12} P_{a2} \end{aligned} \quad (13)$$

- Extremo 1:

Reemplazando la ecuación (13) en la ecuación (8), se obtiene:

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \left(\int_{\Omega_{a1}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a1}^e} N^T N d\Omega \right) \tilde{P}_{a1}^e =$$

$$\sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{be1}} N^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} d\Gamma$$

$$+ \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T (j \omega \Pi_{11} P_{a1} - j \omega \Pi_{12} P_{a2}) d\Gamma$$
(14)

Se compacta la ecuación anterior y se obtiene:

$$(K_{a1} + j \omega C_{a1} - \omega^2 M_{a1}) \tilde{P}_{a1} - j \omega C_{a1a2} \tilde{P}_{a2} = F_{a1}$$
(15)

Se definen las siguientes matrices:

$$K_{a1} = \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Omega_{a1}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega$$
(16)

$$C_{a1} = \Pi_{11} \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N d\Gamma$$

$$M_{a1} = \frac{1}{c_0^2} \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Omega_{a1}^e} N N^T d\Omega$$
(17)

$$C_{a1a2} = \Pi_{12} \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N d\Gamma$$

$$F_{a1} = \sum_{e=1}^{N_{a1}^e} \int_{\Gamma_{a1}^e \cap \Gamma_{be1}} N^T \frac{\partial P_{a1}}{\partial n} d\Gamma$$

- Extremo 2

Se sustituye la ecuación (12) en la ecuación (9) y se obtiene:

$$\sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \left(\int_{\Omega_{a2}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega - k_0^2 \int_{\Omega_{a2}^e} N^T N d\Omega \right) \tilde{P}_{a2}^e =$$

$$\sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{be2}} N^T \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} d\Gamma \quad (18)$$

$$+ \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T (j \omega \Pi_{21} P_{a1} - j \omega \Pi_{22} P_{a2}) d\Gamma$$

Al compactar la última ecuación, se expresa como:

$$(K_{a2} + j \omega C_{a2} - \omega^2 M_{a2}) \tilde{P}_{a2} - j \omega C_{a2a1} \tilde{P}_{a1} = F_{a2} \quad (19)$$

Se definen las siguientes matrices:

$$K_{a2} = \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Omega_{a2}^e} \nabla^T N \nabla N d\Omega$$

$$C_{a2} = \Pi_{22} \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N d\Gamma \quad (20)$$

$$M_{a2} = \frac{1}{c_0^2} \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Omega_{a2}^e} N N^T d\Omega$$

$$C_{a1a2} = \Pi_{21} \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{int}} N^T N d\Gamma$$

$$F_{a2} = \sum_{e=1}^{N_{a2}^e} \int_{\Gamma_{a2}^e \cap \Gamma_{be2}} N^T \frac{\partial P_{a2}}{\partial n} d\Gamma$$

Con las ecuaciones (15) y (18), se obtiene el sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} & \left[\begin{pmatrix} K_{a1} & 0 \\ 0 & K_{a2} \end{pmatrix} + j\omega \begin{pmatrix} C_{a1} & -C_{a1a2} \\ -C_{a2a1} & C_{a2} \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} M_{a1} & 0 \\ 0 & M_{a2} \end{pmatrix} \right] \begin{Bmatrix} \widetilde{P}_{a1} \\ \widetilde{P}_{a2} \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} F_{a1} \\ F_{a2} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

De manera que se comparta, se obtiene la siguiente expresión:

$$(K_a + j \omega C_a) \widetilde{P}_a = F_a \quad (22)$$

Finalmente se define la matriz de cuatro polos T^m , la cual depende de las propiedades del monolito, con lo que se obtiene la siguiente expresión:

$$T^m = \begin{pmatrix} T_{11}^m & T_{12}^m \\ T_{21}^m & T_{22}^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_m L_m) & \frac{j\rho_m C_m \text{Sen}(k_m L_m)}{\phi} \\ \frac{j\phi \text{sen}(k_m L_m)}{\rho_m C_m} & \cos(k_m L_m) \end{pmatrix} \quad (23)$$

Donde:

$L_m =$ longitud del monolito

$k_m = \frac{\omega}{c_m} =$ número de onda equivalente del monolito

$\rho_m = \rho_0 \cdot \left(1 + \frac{R \cdot \phi}{j \cdot \omega \cdot \rho_0} \cdot G_c(s) \right) =$ densidad equivalente

$c_m = \frac{c_0}{\sqrt{\left(1 + \frac{R \cdot \phi}{j \cdot \omega \cdot \rho_0} \cdot G_c(s) \right) \cdot (\gamma - (\gamma - 1) \cdot F)}}$
 $=$ velocidad equivalente

$R =$ Resistividad del monolito

$\omega =$ Frecuencia angular

$\phi = \text{Porosidad del monolito}$

$$c_0 = 340 \frac{m}{s} \text{ (a } 15^\circ C)$$

$$\rho_0 = 1,225 \frac{kg}{m^3} \text{ (a } 15^\circ C)$$

$\gamma = \text{relación de calor específico}$

3.5.2. MODELO 3D Y MODELO 1D: TRAMPA DE PARTÍCULAS (DPF)

El modelo matemático para la trampa de partículas se establece como un campo acústico tridimensional tanto en los conductos como en la cámara de entrada y salida del monolito. Las características unidimensionales se aplican en los capilares de los conductos del monolito.

3.5.2.1. MODELO 1D DPF

La trampa de partículas se puede dividir en 5 secciones como se presenta a continuación:

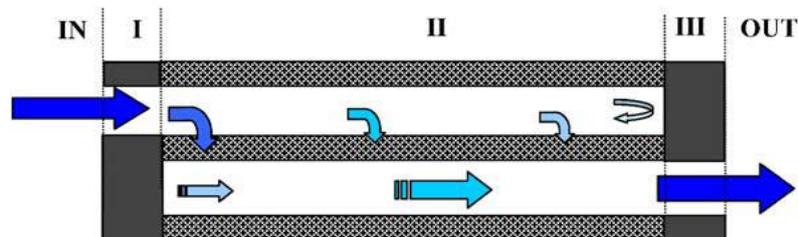


Figura 6: Sección longitudinal del filtro de trampa de partículas [10].

- (IN) = Sección de entrada
- (I) = Tubo estrecho con paredes impermeables
- (II) = Sección longitudinal del tubo con paredes porosas
- (III) = Tubo estrecho con paredes impermeables
- (OUT) = Sección de salida

Una vez se encuentran definidas las variables se representa como una matriz de transferencia de dos polos:

$$T_{DPF} = T_{IN}T_I T_{II}T_{III}T_{OUT} \quad (24)$$

3.5.2.2. SECCIÓN (II) DEL FILTRO DPF

Se asume un flujo continuo con lo que se obtiene la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial t} + U_{oj} \frac{\partial \rho_j}{\partial x} + \frac{\partial u_j}{\partial x} = (-1)^j \frac{4\rho_\omega}{dh_j} u_w \quad (25)$$

Además de la ecuación de momento:

$$\rho_{oj} \left(\frac{\partial}{\partial t} + U_{oj} \frac{\partial}{\partial x} \right) u_j = -\frac{\partial p_j}{\partial x} - \alpha_j u_j \quad (26)$$

Una vez resuelta las ecuaciones se observa que se presenta un modelo isoterma, debido a que no existe la presencia de un gradiente, esto se debe a que en la ecuación no hay transferencia de energía. En las ecuaciones que se han presentado la variable j considera los valores 1 y 2 para la entrada y la salida respectivamente.

La densidad, velocidad y la presión fluctuante de forma axial son representadas como ρ_j, u_o, p_j . A continuación, se describen las variables de la Figura: 7.

$U_o =$ Velocidad del aire

$\rho_o =$ Densidad del aire

$\rho_\omega =$ Densidad del gas sobre las paredes porosas

$u_\omega =$ Fluctuación de la velocidad por las paredes

$d_h =$ Anchura del canal cuadrado

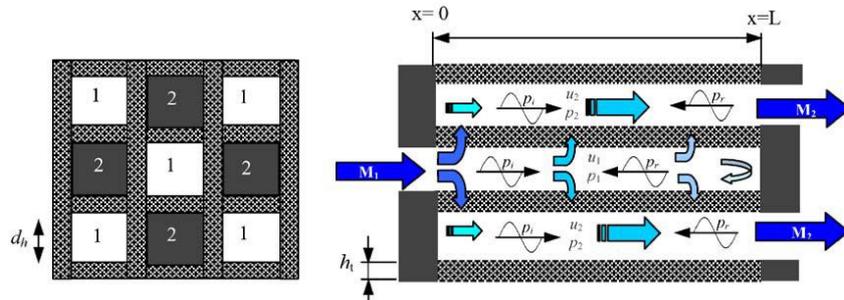


Figura 7: Comportamiento del fluido en el filtro de partículas [10].

Las frecuencias muy bajas en el límite de las paredes, se puede considerar como un flujo laminar, por ello se asume un factor de caída $\alpha = \mu\varepsilon / d_h^2$, en donde μ representa la viscosidad dinámica mientras que ε es el factor de caída de presión. Debido a que el flujo total atraviesa por las paredes una pequeña proporción del flujo axial, por lo cual la velocidad se comporta como un flujo laminar en los conductos cuadrados con paredes impermeables, por lo cual $\varepsilon = 28,45$ [10] [16] [17].

La unión entre los campos en los extremos 1 y 2 se conecta mediante las paredes porosas, debido a que son muy delgadas. Mediante la ley de Darcy, también conocida como la resistencia al flujo en estado estable se aplica asimismo a los campos acústicos fluctuantes [18]. La resistencia de una pared constante se describe como:

$$R_w = (p_1 - p_2) / u_w \quad (27)$$

La resistencia en la pared se puede asociar a propiedades como la porosidad de la pared con el paso del fluido [10] [16] [17].

$$R_w = \frac{\mu_w h_t}{\sigma_w} \quad (28)$$

Donde μ_w es la viscosidad dinámica, h_t es el espesor y σ_w es la permeabilidad de la pared.

La solución del problema se obtiene mediante el uso de una onda de propagación ansatz la cual incluye una dependencia armónica entre el espacio y el tiempo. Se elimina la dependencia armónica $e^{i\omega t}$, la cantidad de fluctuación se describe como:

$$\begin{aligned} P_j(x) &= \hat{p}_j e \cdot i^{Kx}, & u_j(x) &= \hat{u}_j e^{-iKx} \\ p_j &= c_j^2 \hat{p}_j, \\ p_j &= Z_j \hat{u}_j, \end{aligned} \quad (29)$$

En donde la tilde representa la amplitud compleja, K es el número complejo de onda, c es la velocidad del sonido y Z es la impedancia característica de la onda. Sustituyendo la ecuación (27) y (29) en la ecuación (25) y (26), se obtiene:

$$\frac{i\omega}{C_j^2} \hat{p}_j + \frac{U_{0j}}{C_j^2} (-iK) \hat{p}_j + \rho_{0j} Z_j^{-1} \hat{p}_j (-iK) = (-1)^j \frac{4\rho_w}{d_{nj} R_w} (\hat{p}_1 - \hat{p}_2), \quad (30)$$

$$\rho_{\sigma j} (i\omega + U_{0j}(-iK)) Z_j^{-1} = iK - \alpha_j Z_j^{-1} \quad (31)$$

De la ecuación (31) se obtiene la ecuación de la impedancia característica:

$$Z_j = \frac{\rho_{0j}\omega - i\alpha_j - \rho_{0j}U_{0j}K}{K} = \frac{\rho_{0j}c_j(K'_j - M_jK)}{K} \quad (32)$$

Donde

$$M_j = \frac{U_{0j}}{c_j} \text{ Número de Mach}$$

$$K'_j = k_j - i\alpha_j / \rho_{0j}c_j$$

$$k_j = \omega/c_j$$

Sustituyendo la ecuación (32) en la ecuación (31) se obtiene:

$$\left(\frac{ik_j}{c_j}\right)\hat{p}_j - \left(\frac{iM_jK}{c_j}\right)\hat{p}_j - \frac{iK^2}{c_j(k'_j - M_jK)}\hat{p}_j = (-1)^j \frac{4\rho_w}{d_{hj}R_w}(\hat{p}_1 - \hat{p}_2) \quad (33)$$

Multiplicando la última expresión por i, c_j y aplicando $c_j\rho_w/d_{hj}R_w$, se obtiene:

$$-(k_j - M_jK)\hat{p}_j + \frac{K^2}{(k'_j - M_jK)}\hat{p}_j = (-1)^j 4iB_j(\hat{p}_1 - \hat{p}_2) \quad (34)$$

La ecuación (34) representa una ecuación lineal homogénea donde su solución presenta valores propios para los números de onda k que corresponde a ondas libres sobre los canales porosos, se describe como:

$$\begin{pmatrix} k_1^2 + 4iB_1(k'_1 - M_1K) & -4iB_1(K_1 - M_1k) \\ -4iB_2(k'_2 - M_2K) & K_2^2 + 4iB_2(k'_2 \cdot M_2k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{p}_1 \\ \hat{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (35)$$

Donde $K_j^2 = K^2 - (k_j - M_jK)(k'_j - M_jK)$.

La ecuación (35) define una ecuación de cuarto orden para los números de onda $K_n, n = 1,2,3,4$. Para cada número de onda existe un modo 2D correspondiente, es decir, un vector propio, estos valores se pueden calcular utilizando MATLAB. Con los modos y valores propios se obtiene una expresión para el campo acústico de sonido en la sección del filtro:

$$\begin{pmatrix} \hat{p}_1(x) \\ \hat{p}_2(x) \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^4 \hat{a}_n e^{-ik_n x} e_n, \quad (36)$$

Donde \hat{a}_n representa la amplitud modal. Con la ecuación anterior, el flujo de volumen acústico se obtiene dividiendo la por la impedancia característica Z_j y multiplicando con el área de la sección transversal d_{hj}^2 de los canales del filtro.

$$\begin{pmatrix} \hat{q}_1(x) \\ \hat{q}_2(x) \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^4 \hat{a}_n e^{-ik_n x} e'_n, \quad (36)$$

Donde $e'_{j,n} = e_{j,n} d_{hj}^2 / Z_{j,n}$. Con la ecuación (35) y (36) se obtiene la matriz de transferencia de cuatro puertos para el filtro, antes de ello se representa la relación entre las amplitudes modales p y q , se describe como:

$$\begin{pmatrix} \hat{p}_1(x) \\ \hat{p}_2(x) \\ \hat{q}_1(x) \\ \hat{q}_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-iK_1 x} e_1 & e^{-iK_2 x} e_2 & e^{-iK_3 x} e_3 & e^{-iK_4 x} e_4 \\ e^{-iK_1 x} e'_1 & e^{-iK_2 x} e'_2 & e^{-iK_3 x} e'_3 & e^{-iK_4 x} e'_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \hat{a}_3 \\ \hat{a}_4 \end{pmatrix} \quad (37)$$

Se introduce la notación $H(x)$ en la ecuación (37), la matriz de cuatro puertos se evalúa desde $x = 0$ y $x = L$, dando así:

$$\begin{pmatrix} \hat{p}_1(0) \\ \hat{p}_2(0) \\ \hat{q}_1(0) \\ \hat{q}_2(0) \end{pmatrix} = H(0) \begin{pmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \hat{a}_3 \\ \hat{a}_4 \end{pmatrix} \text{ y } \begin{pmatrix} \hat{p}_1(L) \\ \hat{p}_2(L) \\ \hat{q}_1(L) \\ \hat{q}_2(L) \end{pmatrix} = H(L) \begin{pmatrix} \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \hat{a}_3 \\ \hat{a}_4 \end{pmatrix} \quad (38)$$

Al resolver las amplitudes modales de la segunda ecuación de la anterior expresión y se obtiene que:

$$\begin{pmatrix} \hat{p}_1(0) \\ \hat{p}_2(0) \\ \hat{q}_1(0) \\ \hat{q}_2(0) \end{pmatrix} = H(0) H^{-1}(L) \begin{pmatrix} \hat{p}_1(L) \\ \hat{p}_2(L) \\ \hat{q}_1(L) \\ \hat{q}_2(L) \end{pmatrix} \quad (39)$$

la matriz de transferencia de cuatro puertos $S = H(0)H^{-1}(L)$ de la ecuación (39), puede ser reducida a una matriz de dos puertos T al aplicar condiciones de contorno sobre la pared rígida en los canales 1 y 2, con $\hat{q}_2(0) = 0$ y $\hat{q}_1(L) = 0$, al derivar se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \hat{p}_1(x) \\ \hat{q}_1(x) \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} \hat{p}_2(x) \\ \hat{q}_2(x) \end{pmatrix} \text{ con } T = \begin{pmatrix} s_{12} - s_{42}s_{11}/s_{41} & s_{14} - s_{44}s_{11}/s_{41} \\ s_{32} - s_{42}s_{31}/s_{41} & s_{34} - s_{42}s_{31}/s_{41} \end{pmatrix} \quad (40)$$

Para conseguir el flujo volumétrico acústico total de todos los canales abiertos (N), con entrada ($x = 0$) y salida ($x = L$). La matriz de dos puertos T_{II} , incluye todos los canales, la cual permite ser relacionada con la matriz T y se obtiene:

$$T_{II} = T \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12}/N \\ NT_{11} & T_{22} \end{pmatrix} \quad (41)$$

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO MEDIANTE ANSYS APDL Y ANSYS WORKBENCH

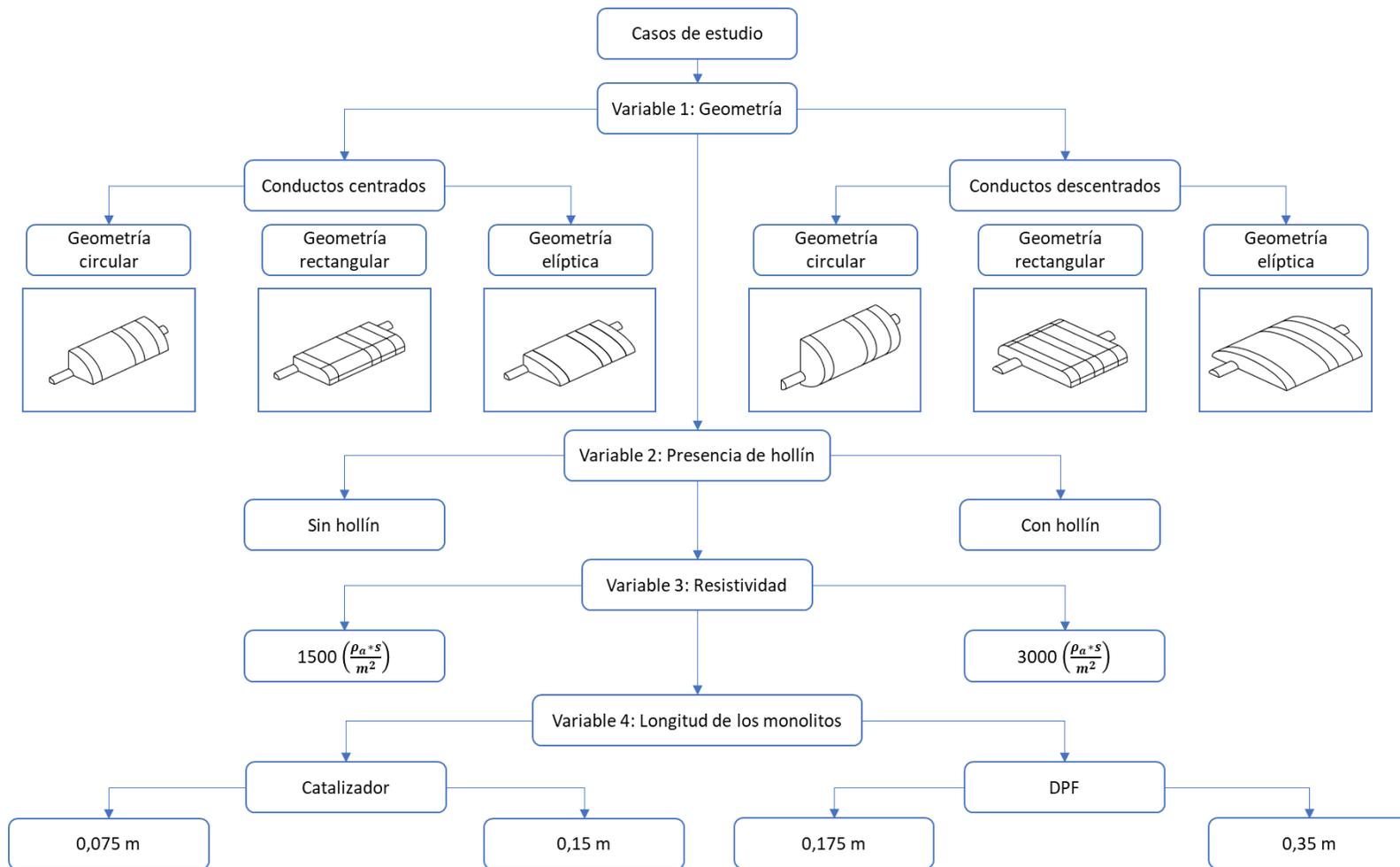


Figura 8: Metodología de trabajo.

4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio del proyecto consiste en el modelado del comportamiento acústico de sistemas con catalizador y trampa de partículas mediante el método de elementos finitos con el programa ANSYS, en donde el modelado, simulación y resultado se obtiene con ANSYS WORKBENCH. Para la validación de los resultados obtenidos se utiliza ANSYS APDL con la ayuda de macros facilitadas por el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la UPV (ANEXOS).

En la Figura 8 se presenta la metodología del proyecto, en la cual se trabaja sobre tres modelos con geometrías de interés: circular, rectangular y elíptica. Los modelos con geometría centrada se modela una cuarta parte del modelo al ser axisimétrico en dos planos de trabajo, mientras en los modelos con conductos descentrados se modela la mitad de la geometría al presentar simetría en un plano. A continuación, se presenta las partes en las cuales se divide la geometría y el sentido del fluido para su estudio:

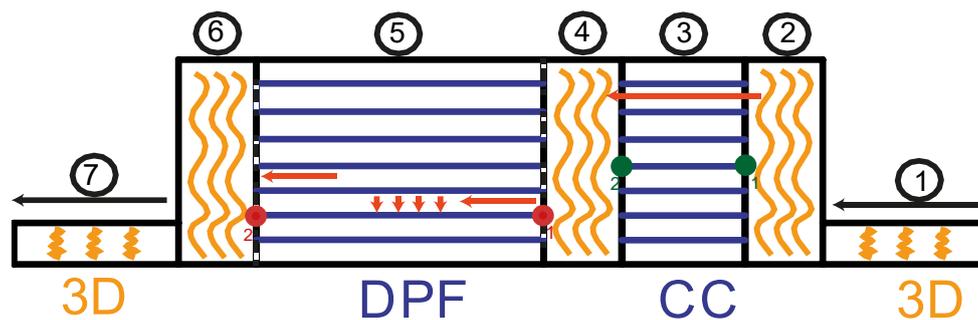


Figura 9: Partes de la geometría.

1. Conducto de entrada
2. Cámara de expansión
3. Monolito del catalizador (CC)
4. Cámara central
5. Monolito del filtro de partículas (DPF)
6. Cámara de contracción
7. Conducto de salida

Se ejecuta 48 casos de estudio para el problema, en donde se analiza el comportamiento de las prestaciones de atenuación sonora de los dispositivos postratamiento (catalizador y filtro de partículas) al modificar las propiedades en los monolitos, configuraciones de geometría, presencia de hollín y la variación de la resistividad. Una vez obtenidos los

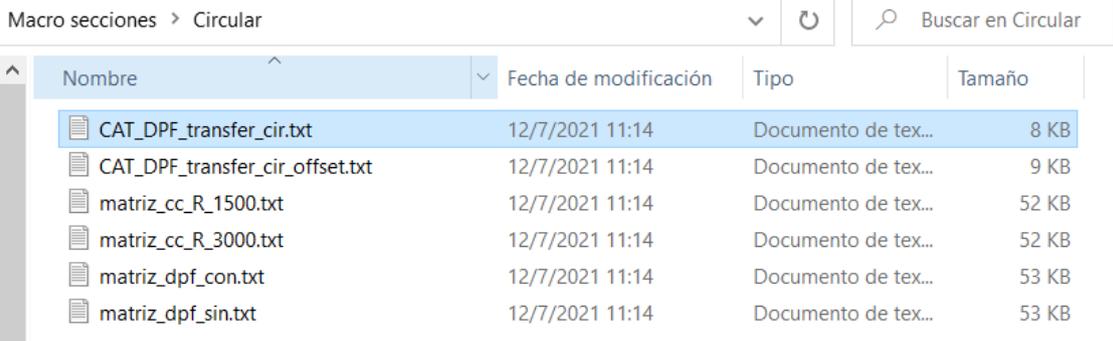
resultados de los casos de estudio se compara el comportamiento del índice de la pérdida de transmisión (TL) entre ANSYS APDL y ANSYS WORKBENCH.

5. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN ANSYS

5.1.ANSYS APDL

ANSYS APDL presenta la ventaja del manejo de macros permitiendo facilitar el control total del modelo paramétrico (geometría, propiedades del material, constantes, condiciones de contorno, solución y representación de resultados), esta se puede ejecutar desde un archivo de texto (.txt, .mac, entre otros) en función de la lectura del archivo.

Es importante generar una carpeta de trabajo en donde se sitúen las macros a emplear Figura 10, para cada geometría se cuenta con 6 macros las cuales contienen los cálculos a ejecutar en los casos de estudio presentados en la Figura 10.



Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
CAT_DPF_transfer_cir.txt	12/7/2021 11:14	Documento de tex...	8 KB
CAT_DPF_transfer_cir_offset.txt	12/7/2021 11:14	Documento de tex...	9 KB
matriz_cc_R_1500.txt	12/7/2021 11:14	Documento de tex...	52 KB
matriz_cc_R_3000.txt	12/7/2021 11:14	Documento de tex...	52 KB
matriz_dpf_con.txt	12/7/2021 11:14	Documento de tex...	53 KB
matriz_dpf_sin.txt	12/7/2021 11:14	Documento de tex...	53 KB

Figura 10: Macros de estudio.

Se abre la interface de ANSYS APDL y se procede a ingresar en el directorio la carpeta generada para las macros, es importante identificar el archivo principal el cual contiene el modelo completo con sus condiciones de contorno con extensión .txt, debido a que el Job Name llevará el nombre de ese archivo Figura 11.

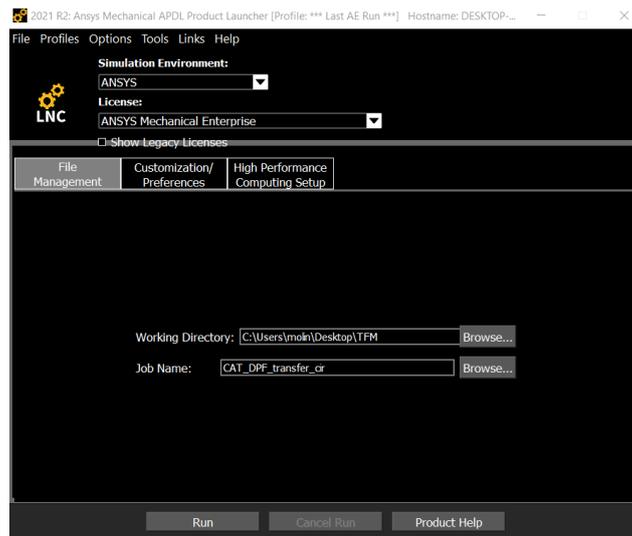


Figura 11: Ventana de configuración de ANSYS APDL.

Una vez dentro de ANSYS APDL, en la pestaña file, se selecciona la opción Read Input From en donde se selecciona el fichero principal el cual se encarga de leer el fichero de texto Figura 12.

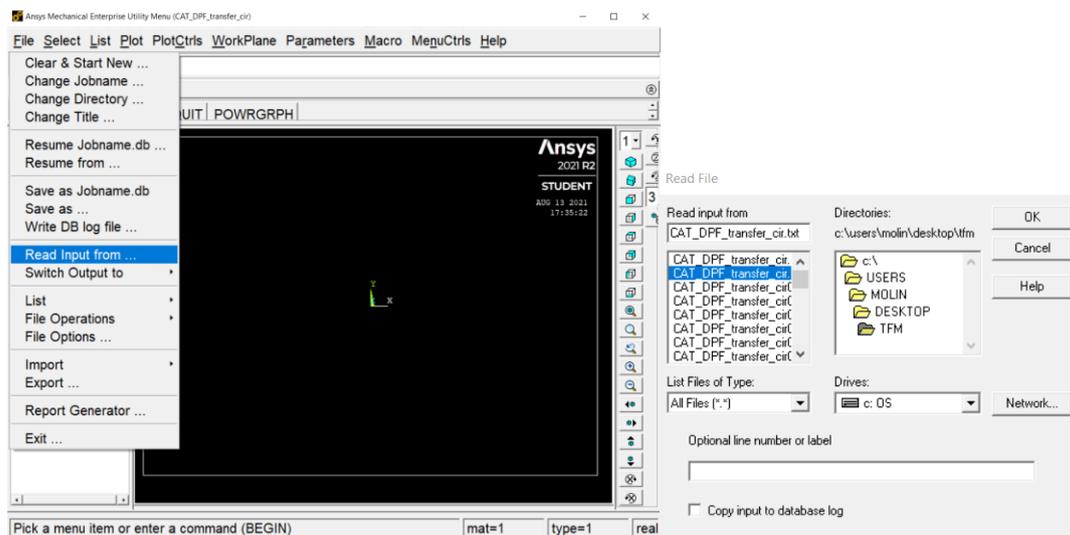


Figura 12: Interface ANSYS APDL.

A continuación, se presentan las constantes utilizadas en la macro, donde se emplean las variables de estudio, entre ellas las propiedades del aire, frecuencias de muestreo, la definición de materiales y el tipo de elemento a aplicar en las regiones con aire como se presenta en la Figura 13.

```

1 | *****
2 |
3 | ! Geometría de sección transversal circular
4 | ! Conductos concéntricos
5 | ! Problema axisimétrico; se modela 1/4 de la geometría
6 |
7 | *****
8 | /title, Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador/Trampa de Partículas
9 | /PREP7
10 | /view,1,1,1,1
11 | rho=1.225           ! Densidad del aire (debe ser consistente con los datos utilizados en los monolitos)
12 | c0=340.255         ! Velocidad del sonido (debe ser consistente con los datos utilizados en los monolitos)
13 | z0=rho*c0          ! Impedancia característica del aire (se utiliza para imponer impedancia anecoica)
14 | f_fin=3000         ! Máxima frecuencia de cálculo
15 | f_ini=10           ! Frecuencia inicial (la final ya está arriba)
16 | deltaf=10         ! Incremento de frecuencia
17 | Nfrec=(f_fin-f_ini)/deltaf+1 ! Número de frecuencias de cálculo
18 | lambda_min=c0/f_fin ! Mínima longitud de onda a la máxima frecuencia
19 | p=1                ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor. Lo hace bien igualmente.
20 | vn=p/(rho*c0)     ! Velocidad normal de excitación
21 |                   ! Definición de elementos y materiales
22 | et,1,183          ! Cuadrilátero cuadrático estructural 2D (solamente para mallar secciones transversales y extruir)
23 | et,2,220,,1       ! Hexaedro acústico de 20 nodos (interpolación cuadrática)
24 | mp,dens,1,rho     ! Material (regiones de aire)
25 | mp,sonc,1,c0
26 |

```

Figura 13: Definición de constantes de estudio.

Las matrices de transferencia de 4 polos se obtienen mediante Matlab, en donde se genera con un fichero con extensión .txt y serán asignadas tanto para el monolito del catalizador (Figura 14) como para el monolito del DPF (Figura 15). Para obtener las propiedades del catalizador se evalúa tanto la longitud como la resistividad en el monolito, mientras que para el DPF se evalúa si existe la presencia de hollín en el monolito. Antes de ejecutar en ANSYS es importante cambiar el nombre de los archivos como “matriz_cc” para las propiedades del catalizador y “matriz_dpff” para el monolito del filtro de partículas.

```

27 | ***** CATALIZADOR *****
28 | ! Cálculo de propiedades de monolito de catalizador (modelo de Allard)
29 | ! Se lee la matriz de transferencia (calculada con Matlab como matriz de admitancias) para reemplazar monolito de catalizador
30 | ! En Matlab se deben utilizar las mismas propiedades, datos, frecuencias, etc. que en el cálculo armónico de Ansys
31 | !
32 | ! El modelo de matriz de transferencia en Ansys solamente admite hexaedros y prismas
33 | mp,dens,2,rho     ! Aire en los capilares
34 | mp,sonc,2,c0
35 | !
36 | tb,perf,2,,ymat  ! Matriz de admitancias
37 | !
38 | /INPUT,'matriz_cc','txt' ! Lectura de fichero creado por Matlab
39 | !
40 | *****

```

Figura 14: Lectura de propiedades del monolito del catalizador.

```

42 | ***** TRAMPA (DPF) *****
43 | ! Cálculo de propiedades de monolito de DPF (modelo de Sabry Allam y Mats Abom, Journal of Sound and Vibration, 2005 y 2006)
44 | ! Se lee la matriz de transferencia (calculada con Matlab como matriz de admitancias) para reemplazar monolito de DPF
45 | ! En Matlab se deben utilizar las mismas propiedades, datos, frecuencias, etc. que en el cálculo armónico de Ansys
46 | !
47 | ! El modelo de matriz de transferencia en Ansys solamente admite hexaedros y prismas
48 | mp,dens,3,rho     ! Aire en los capilares
49 | mp,sonc,3,c0
50 | !
51 | tb,perf,3,,ymat  ! Matriz de admitancias
52 | !
53 | /INPUT,'matriz_dpff','txt' ! Lectura de fichero creado por Matlab
54 | !
55 | *****

```

Figura 15: Lectura de propiedades del monolito del DPF.

La geometría se basa en diseño paramétrico por comandos en donde se define los valores del área principal, la cual se va a extruir, A continuación, se presenta los valores de las distancias de los kpoints, la unión de líneas y la generación del área principal.

```

55 ! *****
56 ! Creación de modelo sólido
57 rinlet=0.0258 ! Conducto de entrada
58 linlet=0.1
59 ! Cámaras de expansión, monolitos y contracción
60 rchamb=0.1275 ! Radio de sección circular
61
62 lchamb1=0.0475
63 lmonolit_cc=0.075 ! Catalizador, longitud ficticia, se reemplaza por matriz
64 lchamb2=0.0475
65 lmonolit_dp=0.175 ! Trampa de partículas, longitud ficticia, se reemplaza por matriz
66 lchamb3=0.0475
67
68 routlet=0.0258
69 loutlet=0.1
70 !
71 ! Secciones transversales
72 !
73 ! Keypoints
74 distancia=0.1 ! Distancia a origen de áreas transversales para posterior extrusión (para evitar solapes)
75 !
76 k,1,,,-distancia
77 k,2,rinlet,,,-distancia
78 k,3,rchamb,,,-distancia
79 k,4,rchamb,,,-distancia
80 k,5,rinlet,,,-distancia
81 !
82 ! Líneas
83 !
84 l,1,2
85 l,2,3
86 larc,3,4,1,rchamb
87 l,4,5
88 l,5,1
89 larc,2,5,1,rinlet
90 !
91 ! Áreas: entrada y salida
92 !
93 al,1,6,5
94 !
95 ! Área: cámara
96 !
97 al,2,3,4,6
98 !
99 type,1
100 mat,1

```

Figura 16: Parámetros de la geometría.

En la Figura 17 se presenta el área principal que se ha generado mediante los comandos presentados anteriormente además del mallado, el cual después se realiza una extrusión para cada cámara, el tamaño de elemento en la malla es de 0,01134 m.

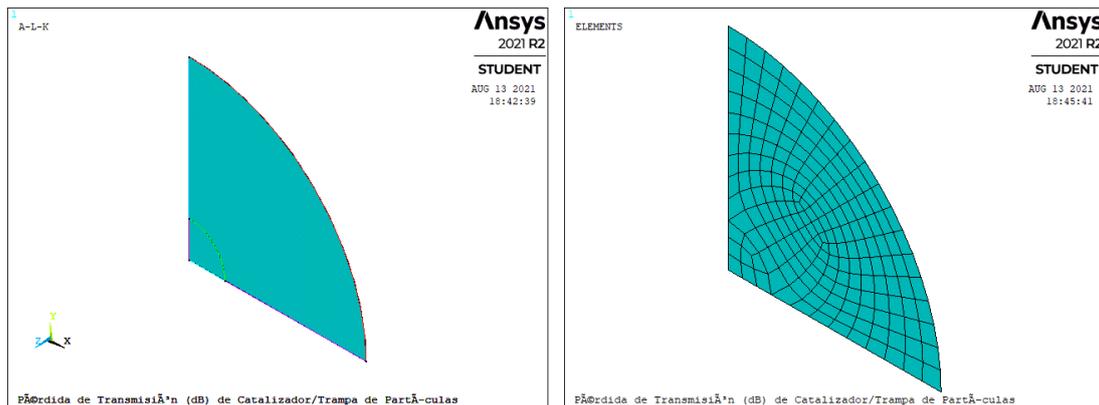


Figura 17: Área principal [izq.] y mallado [der.].

Una vez generada el área principal se copia el área con las respectivas distancias de los puertos mostradas en la Figura 16 y se extruye la malla generada anteriormente como se observa en la Figura 18.

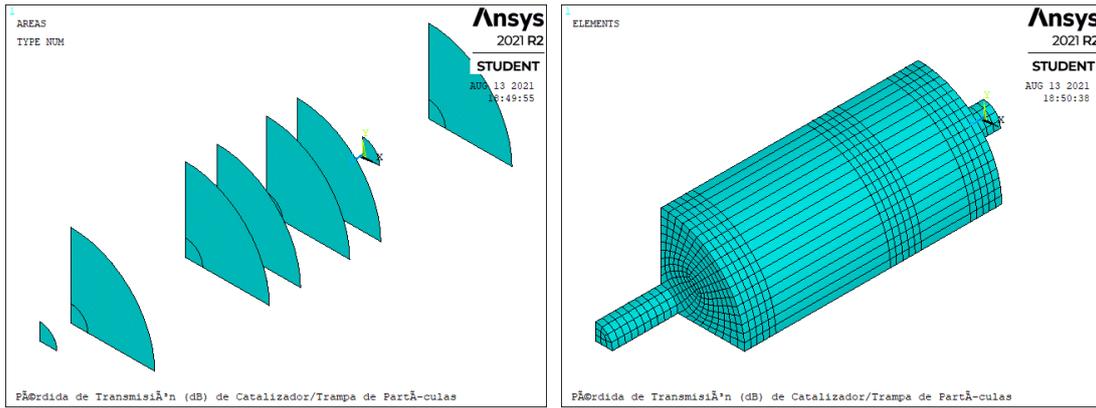


Figura 18: Copia del área principal [izq.] y mallado del modelo [der.] de la geometría circular centrada.

Se procede a asignar las propiedades de los monolitos generadas en Matlab, tanto al monolito del catalizador como en el del DPF mediante la selección de entidades por localización, en donde se aplican las matrices de transferencia que se encuentran en la carpeta principal del proyecto.

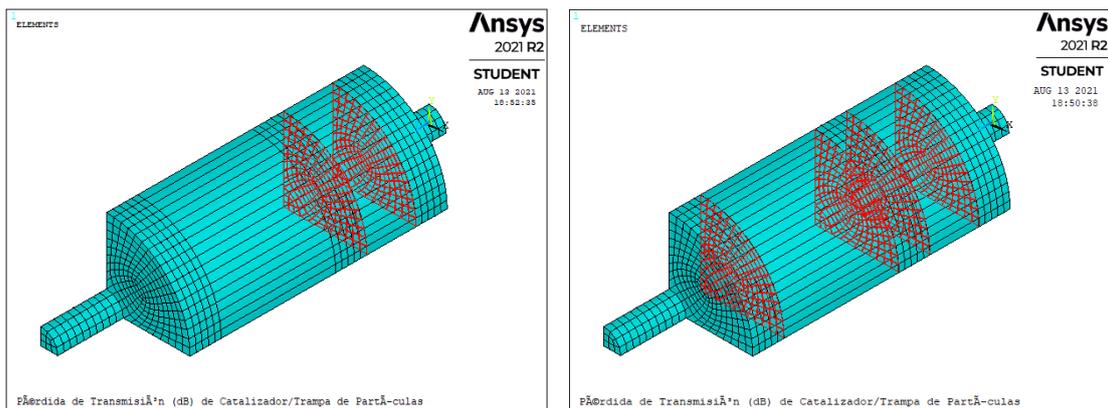


Figura 19: Asignación de propiedades en el puerto del catalizador [izq.] y puerto de DPF [der.].

Al igual que en el paso anterior se procede a la asignación de los puertos de entrada y salida del modelo Figura 20 en donde se aplica una velocidad cuya parte progresiva se encuentra asociada a la presión establecida en el modelo.

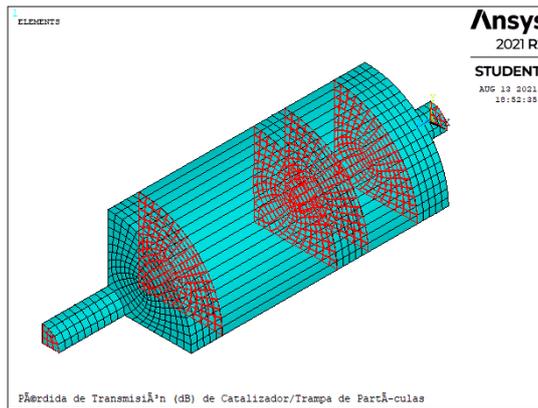


Figura 20: Asignación de propiedades de entrada y salida del modelo.

Una vez resuelta la solución del modelo finalmente se obtiene la pérdida de transmisión TL en decibelios (dB) como se presenta en la Figura 21, además de ello se genera un fichero con extensión “.a2p” con los valores obtenidos en el barrido de frecuencia para el TL.



Figura 21: Pérdida de transmisión TL.

5.2.ANSYS WORKBENCH

ANSYS WORKBENCH al igual que ANSYS APDL presenta el mismo principio de trabajo, con la diferencia que presenta una interface más amigable para el usuario, siendo más intuitiva al momento de manejar la interface y con las herramientas de trabajo similares a APDL, además de ello se puede diseñar mediante bloques o módulos de trabajo el cual sigue un procesado de parámetros con validación de cada operación a realizar.

Una vez abierta la interface en WORKBENCH (Figura 22), la barra de toolbox contiene la pestaña llamada “Analysis Systems” en la cual se eligen los diferentes estudios a ejecutarse para un modelo de elementos finitos.



Figura 22: Interface ANSYS WORKBENCH.

Para iniciar un análisis es necesario la seleccionar o arrastrar el estudio a ejecutar en la sección de “Project Schematic”, el problema se resuelve con un estudio de tipo “Harmonic Acoustics” (Figura 23) en donde se modela el comportamiento acústico de los monolitos del catalizador y la trampa de partículas mediante la pérdida de transmisión.

Se debe considerar que después de finalizar una etapa de trabajo esta debe presentar tick de color verde, caso contrario se muestra un signo de pregunta el cual indica que la etapa no posee suficiente información por lo cual no puede resolver el problema.

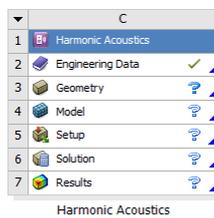


Figura 23: Estudio del análisis de acústica armónica.

5.2.1. ENGINEERING DATA (PROPIEDADES DEL MATERIAL)

Para empezar con el estudio se define que las unidades del programa se encuentren en el Sistema Internacional (SI). En la primera etapa de “Engineering Data” se proporciona las propiedades del material a utilizar, debido a que se estudia el comportamiento acústico y se establece como fluido el aire. A continuación, se crea una variable llamada “aire” (Figura 24) y se asignan sus propiedades características más importantes como la densidad y la velocidad del sonido.

Outline		Properties of Outline Row 4: Air		
		A	B	C
1	Outline of Properties Data			
2	Material			
3	Air	1		
4	Material Variables	2		
5	Density	3	Table	
6	Speed of Sound	4		

Property	Value	Unit
Density	1,225	kg m ⁻³
Speed of Sound	340,26	m s ⁻¹

Figura 24: Propiedades del aire.

5.2.2. GEOMETRY (GEOMETRÍA)

En la siguiente etapa se diseña la geometría del modelo, al realizar un clic en la pestaña de “Geometry” se abre un nuevo programa tipo CAD llamado “Space Claim” en el cual se genera el modelo, similar al paso anterior también se define que las unidades se encuentren en el Sistema Internacional (SI) con la mayor cantidad de decimales posibles para mayor precisión al momento de modelar la geometría.

Una vez dentro de la interface se genera el modelo mediante sketch de manera similar a programas tipo CAD como Inventor o SolidWorks, se sugiere que la orientación del plano de trabajo se encuentre en el plano “XY” (Figura 25).

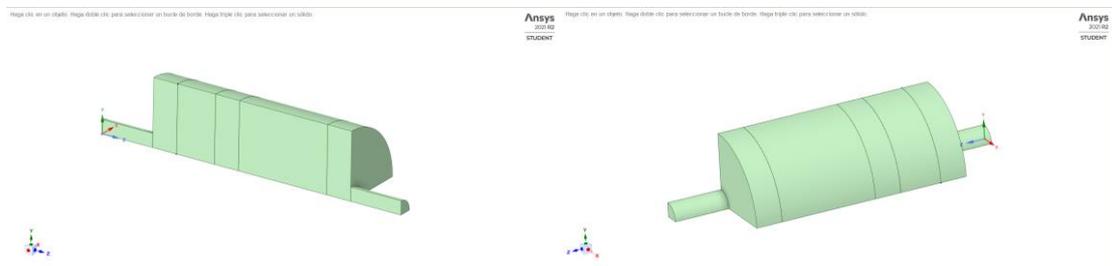


Figura 25: Geometría Circular Centrada en Space Claim.

Se destaca que después de haber generado el boceto, se procede a extruir cada cámara del sistema de escape como un sólido independiente, con lo que se consigue aplicar las condiciones de contorno en cada una de las cámaras correspondientes al sólido, esto es posible con las opciones de arrastrar en la extrusión (Figura 26) con la opción de “Sin fusión”.



Figura 26: Opciones de extrusión.

5.2.3. MODEL (MALLADO)

El mallado corresponde a la etapa más importante y por ende la que presenta mayor influencia con respecto al cálculo con la obtención de resultados, por ello en la etapa de “model” se aplica un método de mallado “Multizone” (multizona) el cual reemplaza al mallado automático y permite definir el mallado por zonas obteniendo mayor flexibilidad en el ajuste de malla.

El método multizona permite indicar los sólidos a mallar, la malla se aplica a todo el sólido a excepción de los monolitos del catalizador y del DPF respectivamente en donde se aplica la matriz de transferencia indicando las propiedades de cada cámara. A través de la opción de “Sweep Size Behavior” se permite seleccionar una arista del sólido realizando un barrido en sus caras “Sweep edges”.

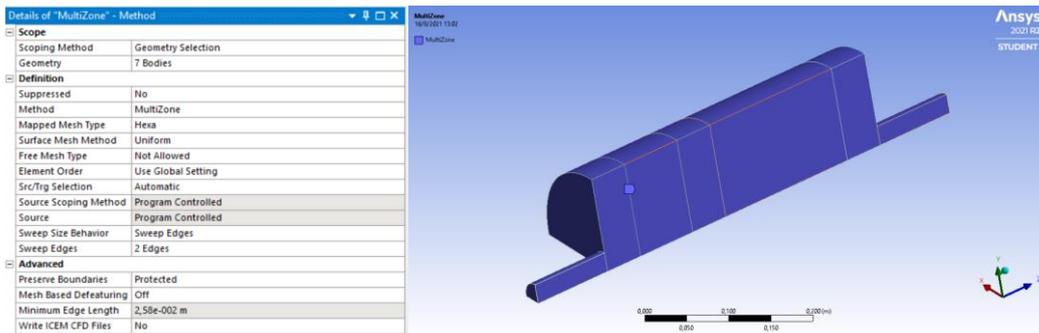


Figura 27: Detalles mallado Multizona [izq.] asignación de aristas en el sólido [der.].

Una vez indicadas las dos caras correspondientes a los monolitos a aplicar el mallado multizona se establece que el mallado presente una división para que el elemento sea continuo, además se indica que el comportamiento de la malla sea similar al de los demás sólidos con la opción “Behavior” activando la opción “Hard” (Figura 28), con solo que se consigue un comportamiento uniforme de la malla sobre todo el sólido.

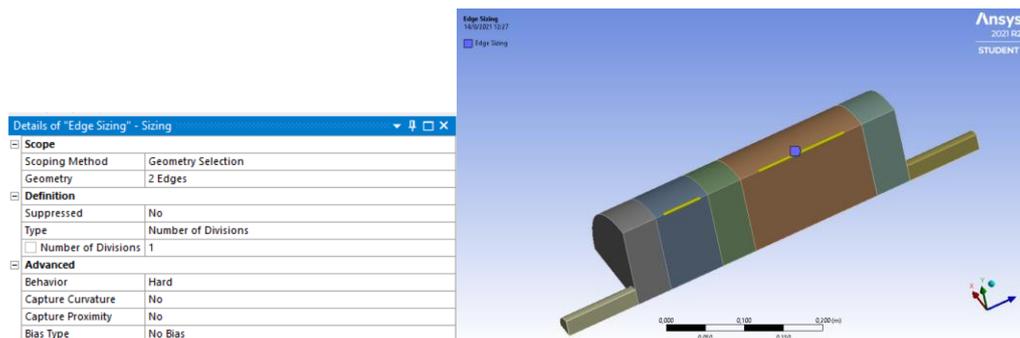


Figura 28: Propiedades de mallado en las caras.

Al aplicar las características mencionadas se configuran las opciones del mallado principal (Figura 29), para ello se establece un valor de elemento de 0,01. Con la opción “Use Adaptive Sizing” se consigue que las propiedades sean las que se encuentran asignadas en las caras. Al activar las opciones de “Mesh Defeaturing”, “Capture

curvature” y “Capture Proximity” se consigue que la malla se adapte al sólido con gran precisión.

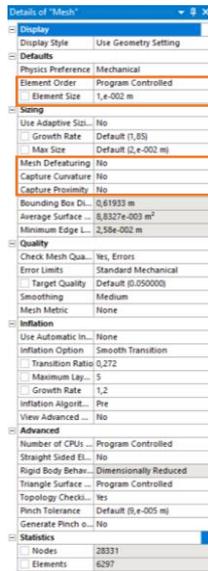


Figura 29: Opciones de mallado.

Con todas las características aplicadas al modelo se procede a generar la malla al sólido, con lo que se obtiene el siguiente resultado:

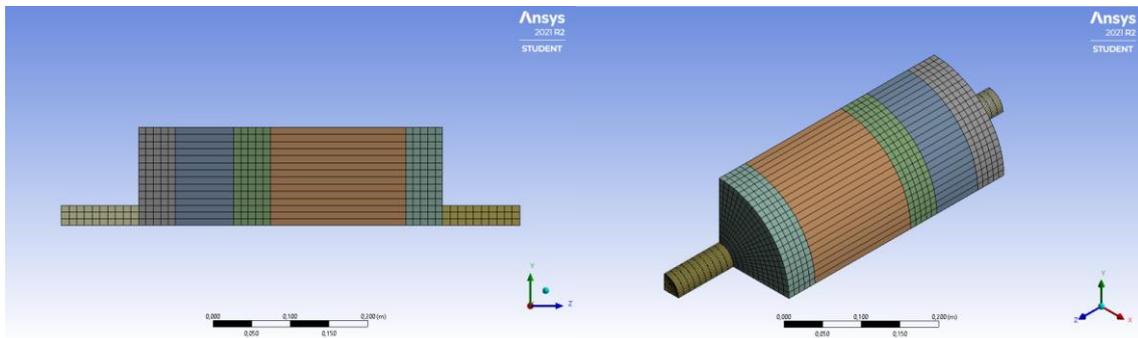
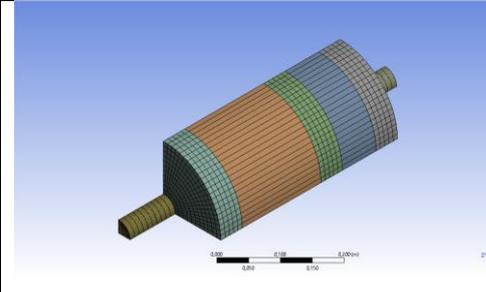
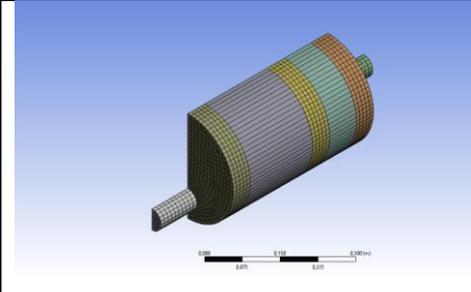
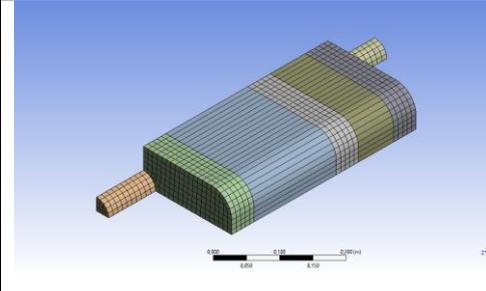
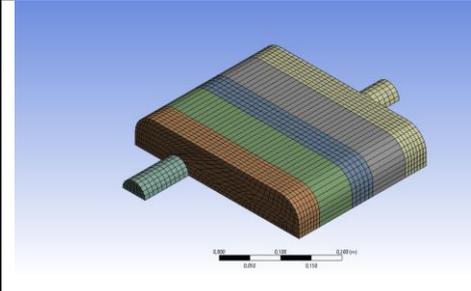
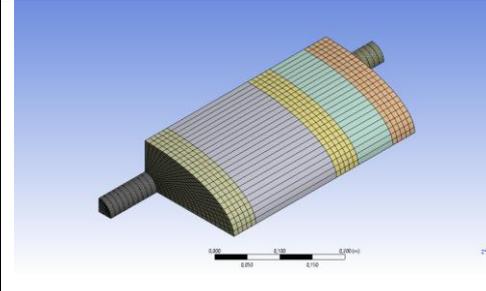
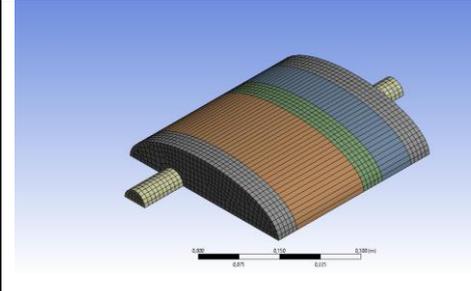


Figura 30: Mallado de la geometría circular centrada.

El proceso de mallado es el mismo para todas las geometrías creadas, con lo que se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 1. Mallado de geometrías en WORKBENCH

	Geometría Centrada	Geometría Descentrada
Circular		
Rectangular		
Elíptica		

5.2.4. SETUP (CONDICIONES DE CONTORNO)

En esta etapa se establece las condiciones de contorno al modelo después de haber generado la malla en el modelo 3D, se aplica las propiedades de material generados en la primera etapa Figura 31, seleccionando uno a uno cada sólido mediante la opción de “Assignment” se define al aire como el material del modelo.

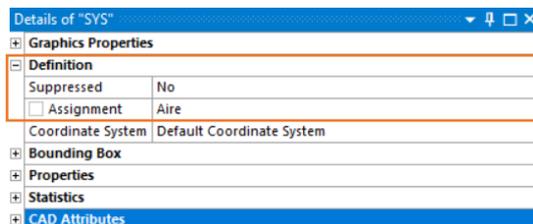


Figura 31: Asignación de propiedades al sólido.

Una vez definidas las propiedades del modelo se procede a seleccionar la región acústica del modelo sólido el cual se compone de la geometría completa considerando que el aire se propaga en los sólidos creados mediante la herramienta “Acoustics Regions” cómo se presenta en la Figura 32.

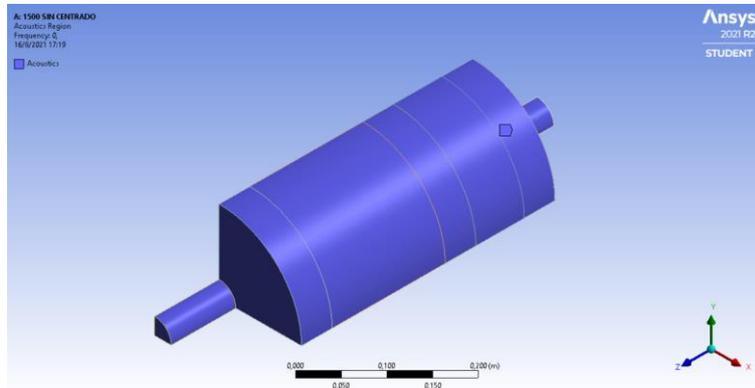


Figura 32: Región acústica.

A través de las matrices de transferencia o admitancia se define el comportamiento de cada monolito en donde se asigna cada una de las propiedades. Es importante mencionar que los monolitos no se encuentran mallados, por lo cual serán reemplazados mediante las matrices de transferencia en donde se encuentran las propiedades de cada uno de ellos. Las propiedades del monolito se asignan a cada puerto en la geometría, estos puertos permiten la comunicación y propagación de la perturbación acústica sobre las paredes de las cámaras tanto en la entrada como en la salida de cada puerto comunicando los monolitos de catalizador como el filtro de partículas DPF.

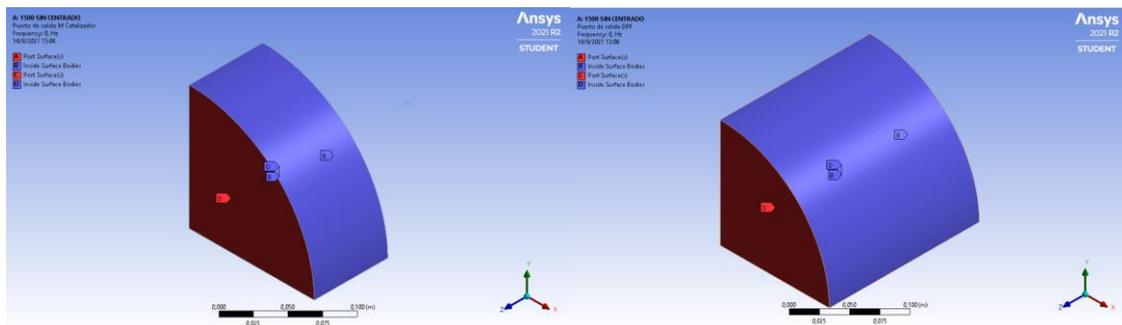


Figura 33: Asignación de puertos de entrada y salida en los monolitos del catalizador [izq.] y DPF [der.].

A cada puerto se define como monolito de entrada y salida tanto para el catalizador como para el DPF por separado, con lo que se consigue cuatro puertos en donde se puede definir la “Transfer admittance matrix” (matriz de admitancia).

En la matriz de la Figura 34 se introduce los coeficientes de admitancias para cada frecuencia Y11, Y12, Y21 e Y22 en el puerto 1 (entrada) y el puerto 2 (salida) correspondientes al monolito del catalizador, en donde se considera su parte real e imaginaria con la mayor cantidad de decimales posibles para mayor precisión del cálculo. Este proceso se repite para el monolito del filtro de partículas DPF tanto para el puerto 3 (entrada) y puerto (4).

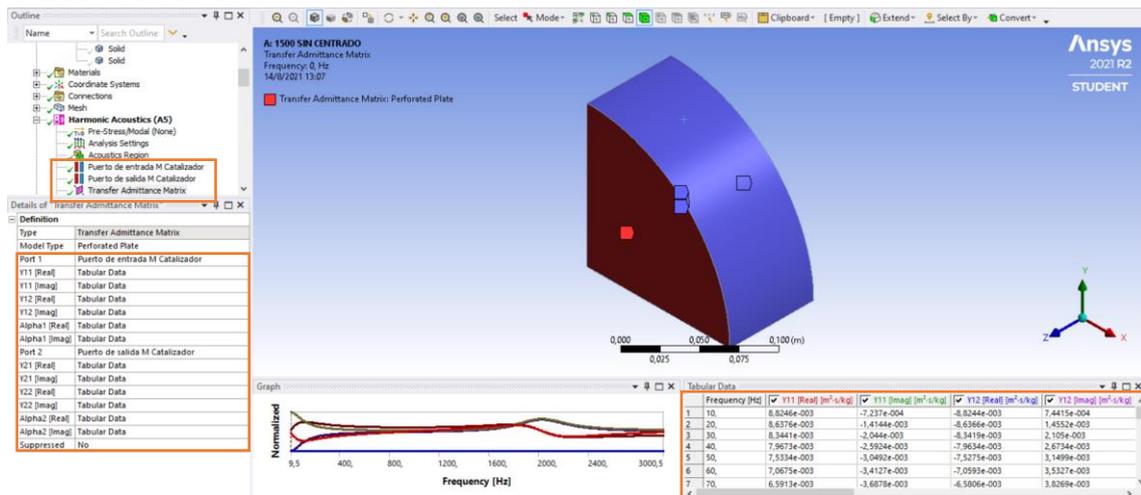


Figura 34: Definición de la matriz de admitancia para el monolito del catalizador.

Una vez definidos los puertos en los monolitos, se asigna los puertos de entrada y salida del modelo, considerando el sentido de flujo del aire como se ha presentado en la Figura 9, se asigna al puerto de entrada el conducto con menor coordenada en el eje z, en donde se selecciona el sólido y la cara del puerto como se muestra en la Figura 35, se repite el proceso para el puerto de salida en donde se selecciona el conducto final con mayor coordenada en el eje z.

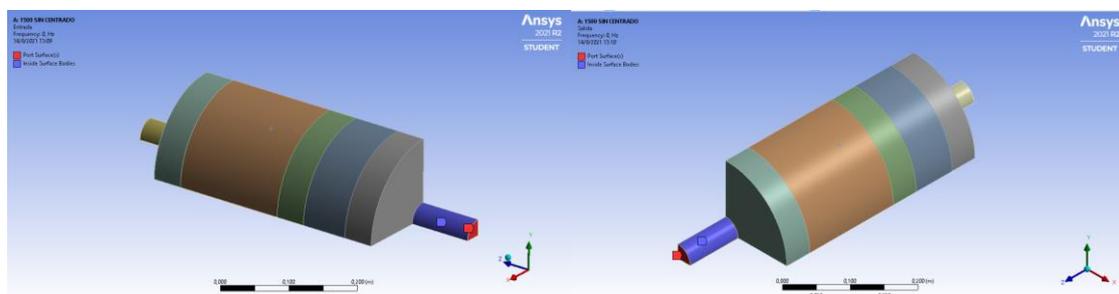


Figura 35: Definición del puerto de entrada [izq.] y salida [der.] de la geometría.

Las superficies que no se han definido como puertos se les asigna como una “Rigid Wall” (pared rígida) a todas las caras externas del modelo sin incluir las dos caras

correspondientes a los conductos de entrada y salida de los puertos de la geometría como se muestra en la Figura 36.

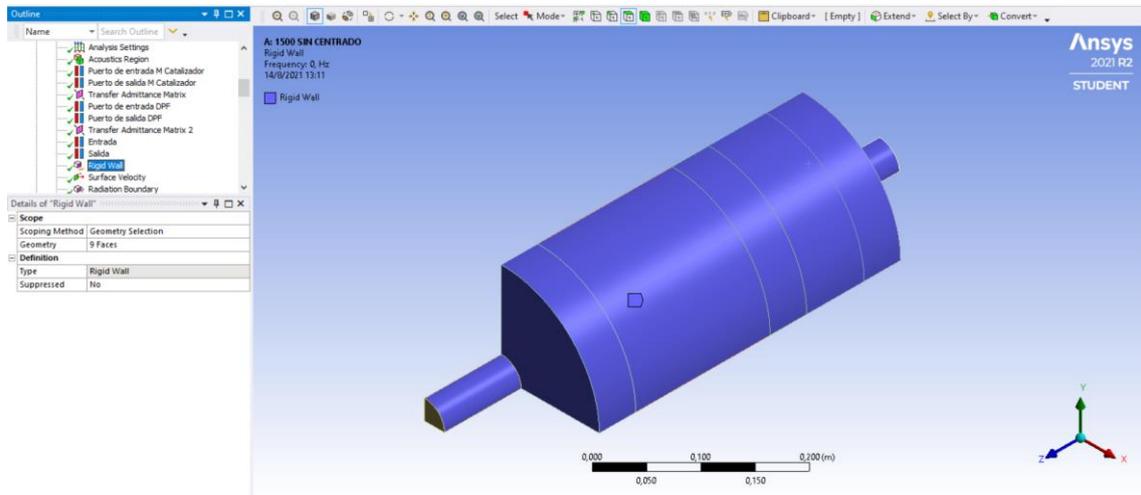


Figura 36: Caras asignadas de la pared rígida.

Se define una excitación correspondiente a una onda acústica en el conducto de entrada como se indica en la Figura 37 mediante la opción “Surface Velocity”, esta excitación se basa en una onda armónica con una velocidad de -1 m/s , como referencia se considera al eje z positivo para propagación, por ello se indica el signo negativo en la velocidad.

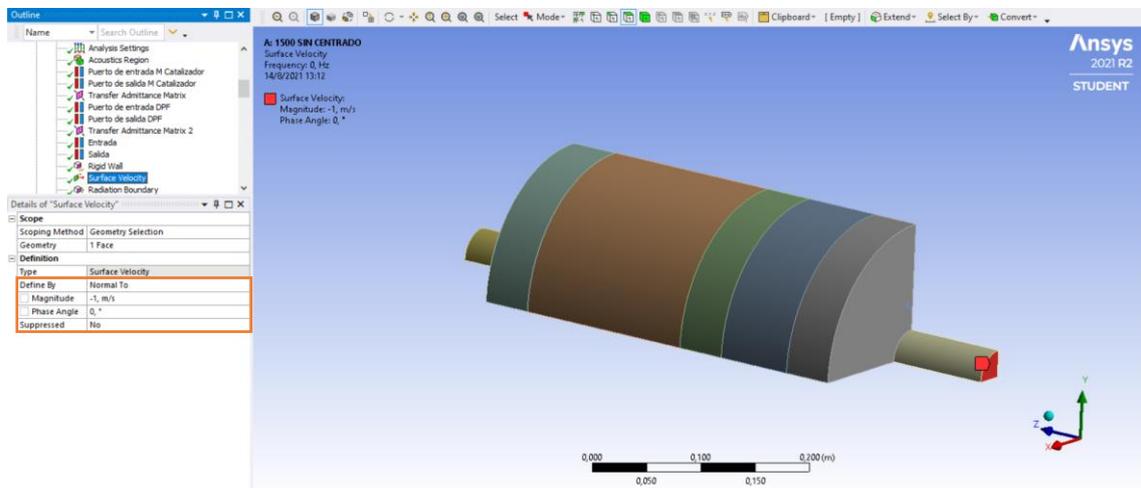


Figura 37: Definición de la excitación acústica al modelo.

Se establece que salida del conducto se comporte como una salida anecoica, con lo que se consigue que no se presenten ondas reflejadas en el exterior, esto se obtiene mediante la opción de “Acoustic Boundary Conditions” en Radiation Boundary seleccionando tanto la cara de entrada como salida de los de los puertos de entrada y salida respectivamente (Figura 38).

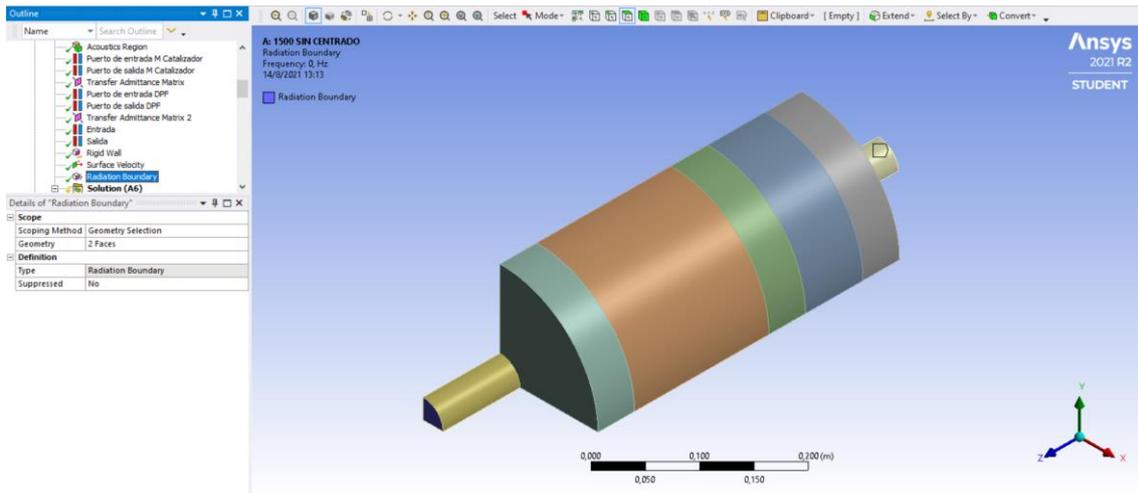


Figura 38: Conductos de entrada y salida de tipo anecoico.

5.2.5. SOLUTION (SOLUCIÓN)

Después de definir las etapas anteriores se establece las condiciones del análisis a definir, a través de la opción de “Analysis settings” se consigue que la solución realice un barrido de frecuencia de 0 a 3000 Hz con un intervalo de 300, por lo que se obtiene que la solución se calcule cada 10 Hz.

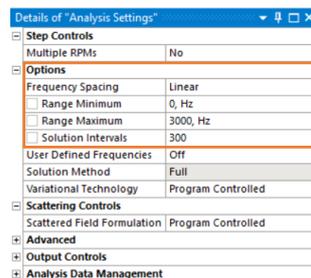


Figura 39: Configuración de ajustes del análisis

Una vez definidas las condiciones en el análisis se ingresa a la etapa “Solution” en donde se define el estudio a realizar. Se establece un análisis de pérdida de transmisión mediante la opción “Transmission Loss” en donde se estudia el comportamiento de la pérdida de transmisión (TL) para el barrido de frecuencias establecido anteriormente tanto para el monolito del catalizador como para el DPF. Para ello es necesario definir los puertos de entrada y salida como “Input Port” y “Output Port” respectivamente como se muestra en la Figura 40, después de la establecer la configuración de análisis se procede a resolver el problema mediante la opción “Solve”, con lo que se obtiene el resultado del estudio.

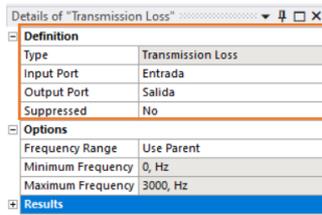


Figura 40: Detalles del análisis.

5.2.6. RESULTS (RESULTADOS)

Una vez completadas las etapas del modelo se obtiene la Figura 41 en donde se indica que el cálculo ha sido realizado con éxito una vez resuelto el problema.

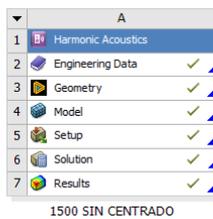


Figura 41: Etapas completadas.

En la etapa de resultados “Results” se puede visualizar la gráfica del índice de la pérdida de transmisión (TL) con el barrido de frecuencias calculadas como se muestra en la Figura 42.

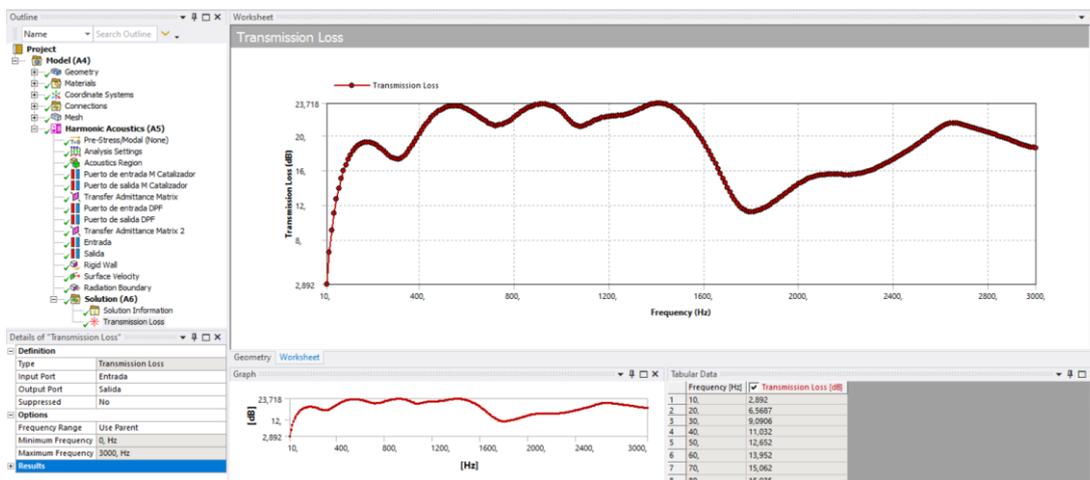


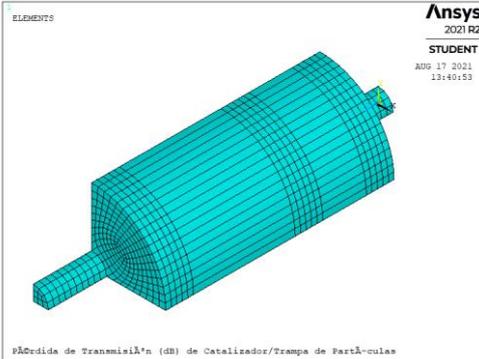
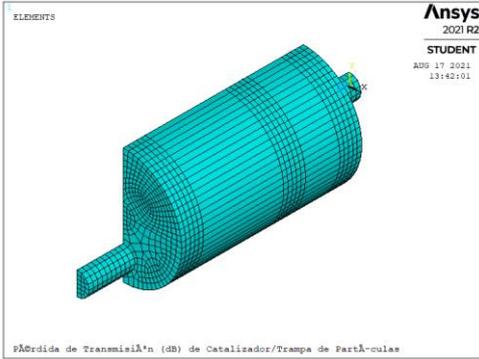
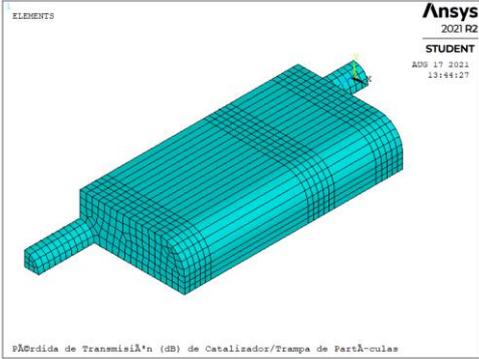
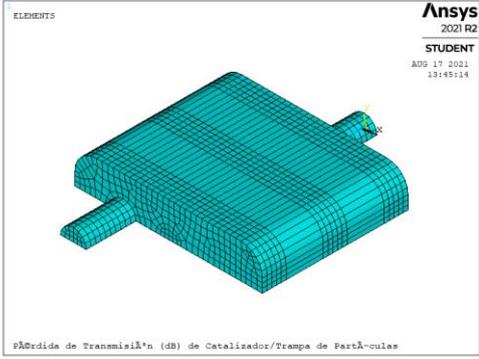
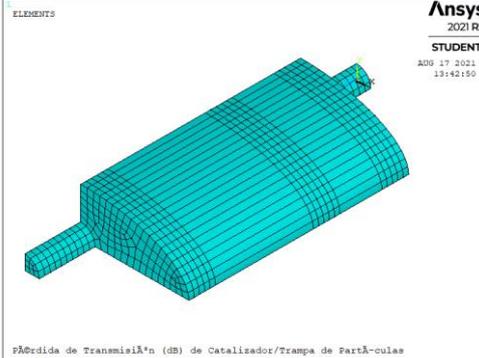
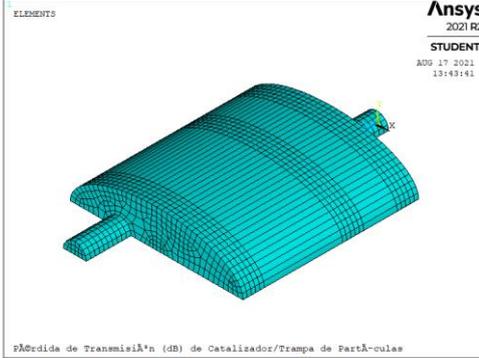
Figura 42: Resultado del cálculo.

5.3.VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para validar el resultado de los modelos geométricos se comparan los valores de pérdida de transmisión (TL) obtenidos en ANSYS WORKBENCH con ANSYS APDL, con lo cual se puede determinar la aproximación de cálculo obtenida en el estudio.

A continuación, se presentan los modelos empleados en ANSYS APDL para validar el modelo realizado con ANSYS WORKBENCH.

Tabla 2. Mallado de geometrías en APDL

	Geometría Centrada	Geometría Descentrada
Circular	 <p>ANSYS 2021 R2 STUDENT AUG 17 2021 13:40:53</p> <p>Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador/Trampa de Partículas</p>	 <p>ANSYS 2021 R2 STUDENT AUG 17 2021 13:42:01</p> <p>Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador/Trampa de Partículas</p>
Rectangular	 <p>ANSYS 2021 R2 STUDENT AUG 17 2021 13:44:27</p> <p>Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador/Trampa de Partículas</p>	 <p>ANSYS 2021 R2 STUDENT AUG 17 2021 13:45:14</p> <p>Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador/Trampa de Partículas</p>
Elíptica	 <p>ANSYS 2021 R2 STUDENT AUG 17 2021 13:42:50</p> <p>Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador/Trampa de Partículas</p>	 <p>ANSYS 2021 R2 STUDENT AUG 17 2021 13:43:41</p> <p>Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador/Trampa de Partículas</p>

En la Figura 43 se muestra de forma gráfica los resultados obtenidos de la pérdida de transmisión (TL) tanto para ANSYS APDL, como ANSYS WORKBENCH en el caso de estudio de la geometría circular con conductos centrados, sin la presencia de hollín y con una resistividad de $1500 \left(\frac{Pa \cdot s}{m^2}\right)$.

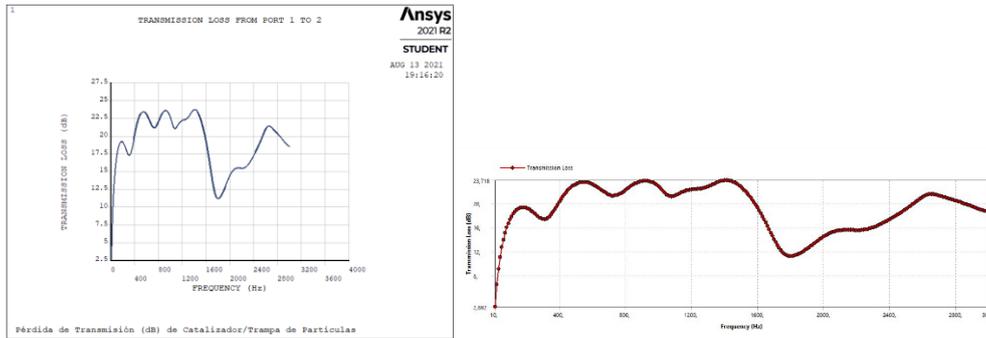


Figura 43: Resultados obtenidos de TL en ANSYS APDL [izq.] y WORKBENCH [der.].

Para validar el estudio se procede a comparar los resultados obtenidos gráficamente entre APDL y WORKBENCH. La comparación se realiza sobre el caso de estudio con las geometrías de interés centradas, sin considerar la presencia de hollín y con una resistividad de $1500 \left(\frac{Pa \cdot s}{m^2}\right)$.

Cuando se analiza los resultados del estudio se observa gran similitud entre ambos métodos por lo que las curvas tanto de APDL como la de WORKBENCH se superponen durante todo el barrido de frecuencia sin presentar discrepancias.

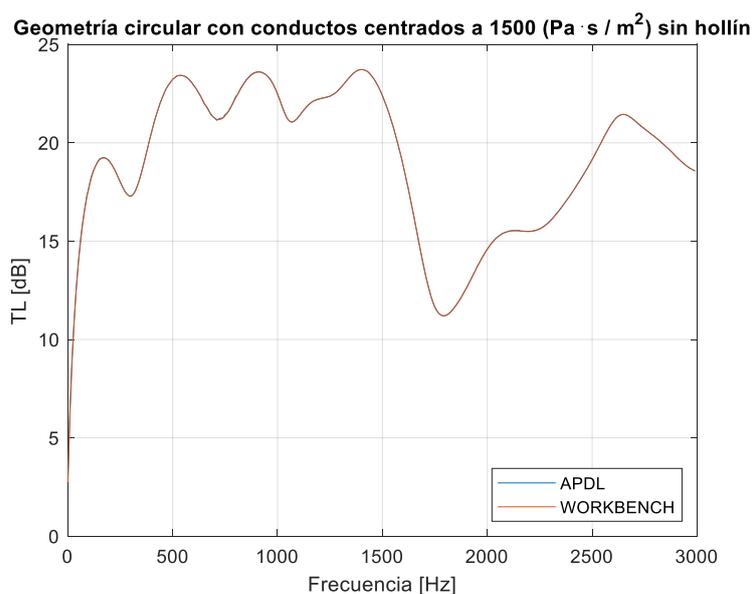


Figura 44: Comparación de resultados ANSYS APDL y WORKBENCH sobre la geometría circular.

Geometría rectangular con conductos centrados a 1500 (Pa · s / m²) sin hollín

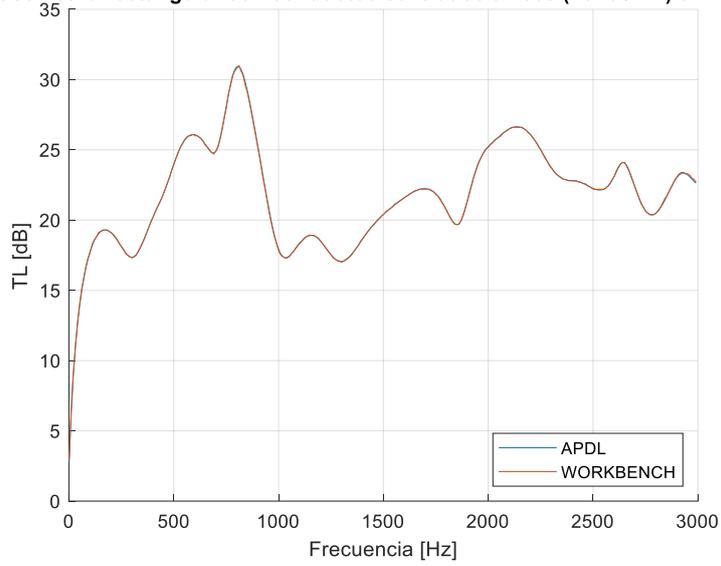


Figura 45: Comparación de resultados ANSYS APDL y WORKBENCH sobre la geometría rectangular.

Geometría elíptica con conductos centrados a 1500 (Pa · s / m²) sin hollín

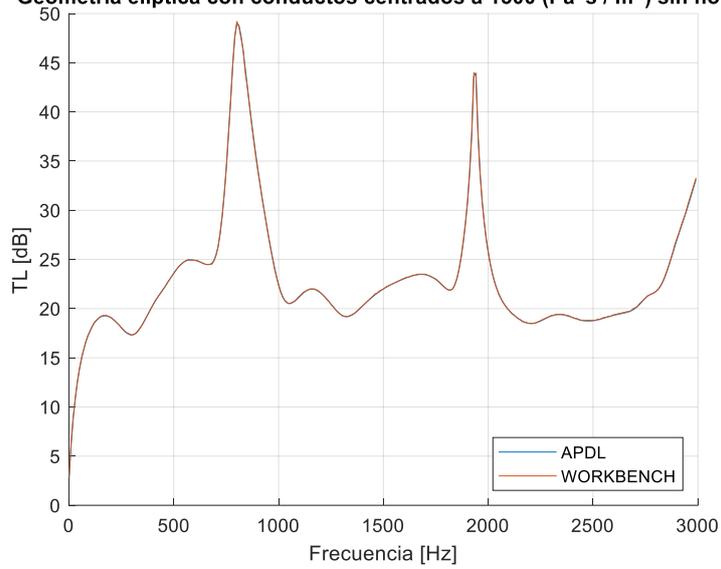


Figura 46: Comparación de resultados ANSYS APDL y WORKBENCH sobre la geometría elíptica.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de que se ha establecido la metodología y el planteamiento del problema entre ANSYS APDL Y WORKBENCH se ha observado un comportamiento similar entre el resultado de los casos de estudio. El estudio se centra en determinar el comportamiento de prestaciones de atenuación sonora al modificar las propiedades en los monolitos, configuraciones de geometría, presencia de hollín y la variación de la resistividad sobre 3 geometrías de interés: circular, rectangular y elíptica.

El estudio considera que la temperatura del aire se encuentra a 15 °C para determinar la influencia de la pérdida de transmisión (TL) obtenida. Para estimar la diferencia entre los dos métodos de estudios se ha calculado el error entre los resultados obtenidos entre ANSYS APDL y WORKBENCH como se presenta a continuación.

$$Error (\%) = \frac{\sum |TL_i^{APDL} - TL_i^{WORKBENCH}|}{\sum TL_i^{APDL}} \quad (42)$$

Donde “i” es la sumatoria de cada frecuencia del estudio de la pérdida de transmisión (TL). A continuación, se presentan los casos de estudio realizado con el error obtenido en cada estudio.

Tabla 3. Error calculado para cada caso de estudio

Casos de estudio	Geometría	Resistividad ($\frac{Pa \cdot s}{m^2}$)	Hollín	Longitud monolito Catalizador (m)	Longitud monolito DPF (m)	Error (%)
1	Circular con conductos centrados	1500	No	0,075	0,175	0,0216
2	Circular con conductos centrados	1500	Sí	0,075	0,175	0,0313
3	Circular con conductos centrados	3000	No	0,075	0,175	0,0197
4	Circular con conductos centrados	3000	Sí	0,075	0,175	0,02847

Casos de estudio	Geometría	Resistividad ($\frac{Pa \cdot s}{m^2}$)	Hollín	Longitud monolito Catalizador (m)	Longitud monolito DPF (m)	Error (%)
5	Circular con conductos centrados	1500	No	0,15	0,35	0,0172
6	Circular con conductos centrados	1500	Sí	0,15	0,35	0,0160
7	Circular con conductos centrados	3000	No	0,15	0,35	0,0154
8	Circular con conductos centrados	3000	Sí	0,15	0,35	0,0144
9	Circular con conductos descentrados	1500	No	0,075	0,175	0,0021
10	Circular con conductos descentrados	1500	Sí	0,075	0,175	0,0029
11	Circular con conductos descentrados	3000	No	0,075	0,175	0,0036
12	Circular con conductos descentrados	3000	Sí	0,075	0,175	0,0012
13	Circular con conductos descentrados	1500	No	0,15	0,35	0,0265
14	Circular con conductos descentrados	1500	Sí	0,15	0,35	0,0241
15	Circular con conductos descentrados	3000	No	0,15	0,35	0,0216
16	Circular con conductos descentrados	3000	Sí	0,15	0,35	0,0197

Casos de estudio	Geometría	Resistividad ($\frac{Pa \cdot s}{m^2}$)	Hollín	Longitud monolito Catalizador (m)	Longitud monolito DPF (m)	Error (%)
17	Rectangular con conductos centrados	1500	No	0,075	0,175	0,0080
18	Rectangular con conductos centrados	1500	Sí	0,075	0,175	0,0213
19	Rectangular con conductos centrados	3000	No	0,075	0,175	0,0085
20	Rectangular con conductos centrados	3000	Sí	0,075	0,175	0,0232
21	Rectangular con conductos centrados	1500	No	0,15	0,35	0,0118
22	Rectangular con conductos centrados	1500	Sí	0,15	0,35	0,0109
23	Rectangular con conductos centrados	3000	No	0,15	0,35	0,0109
24	Rectangular con conductos centrados	3000	Sí	0,15	0,35	0,0101
25	Rectangular con conductos descentrados	1500	No	0,075	0,075	0,6211

Casos de estudio	Geometría	Resistividad ($\frac{Pa \cdot s}{m^2}$)	Hollín	Longitud monolito Catalizador (m)	Longitud monolito DPF (m)	Error (%)
26	Rectangular con conductos descentrados	1500	Sí	0,075	0,075	0,9228
27	Rectangular con conductos descentrados	3000	No	0,075	0,075	0,6605
28	Rectangular con conductos descentrados	3000	Sí	0,075	0,075	0,5105
29	Rectangular con conductos descentrados	1500	No	0,15	0,15	0,0074
30	Rectangular con conductos descentrados	1500	Sí	0,15	0,15	0,0069
31	Rectangular con conductos descentrados	3000	No	0,15	0,15	0,0068
32	Rectangular con conductos descentrados	3000	Sí	0,15	0,15	0,0064
33	Elíptica con conductos centrados	1500	No	0,075	0,175	0,0434
34	Elíptica con conductos centrados	1500	Sí	0,075	0,175	0,0628
35	Elíptica con conductos centrados	3000	No	0,075	0,175	0,0159

Casos de estudio	Geometría	Resistividad ($\frac{Pa \cdot s}{m^2}$)	Hollín	Longitud monolito Catalizador (m)	Longitud monolito DPF (m)	Error (%)
36	Elíptica con conductos centrados	3000	Sí	0,075	0,175	0,0535
37	Elíptica con conductos centrados	1500	No	0,15	0,35	0,0269
38	Elíptica con conductos centrados	1500	Sí	0,15	0,35	0,0252
39	Elíptica con conductos centrados	3000	No	0,15	0,35	0,0249
40	Elíptica con conductos centrados	3000	Sí	0,15	0,35	0,0235
41	Elíptica con conductos descentrados	1500	No	0,075	0,175	0,2840
42	Elíptica con conductos descentrados	1500	Sí	0,075	0,175	0,2581
43	Elíptica con conductos descentrados	3000	No	0,075	0,175	0,2655
44	Elíptica con conductos descentrados	3000	Sí	0,075	0,175	0,2422
45	Elíptica con conductos descentrados	1500	No	0,15	0,35	0,0057
46	Elíptica con conductos descentrados	1500	Sí	0,15	0,35	0,0054
47	Elíptica con conductos descentrados	3000	No	0,15	0,35	0,0053

Casos de estudio	Geometría	Resistividad ($\frac{Pa \cdot s}{m^2}$)	Hollín	Longitud monolito Catalizador (m)	Longitud monolito DPF (m)	Error (%)
48	Elíptica con conductos descentrados	3000	Sí	0,15	0,35	0,0053

6.1. INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA CON CONDUCTOS CENTRADOS FRENTE A CONDUCTOS DESCENTRADOS

Para el estudio en la geometría circular se establece que el conducto de entrada se encuentre centrado mientras que el conducto de salida se encuentra descentrado con un offset de 0.08 m. Esta distancia ha sido calculada para que el conducto de salida coincida con la línea nodal de presión nula del primer modo radial de orden superior.

$$Offset = 0.6276 \cdot R \quad (43)$$

Donde:

R = radio de la circunferencia.

El estudio se realiza con una resistividad de $1500 \left(\frac{Pa \cdot s}{m^2} \right)$ en el monolito de catalizador tanto para la geometría centrada como para la descentrada, no se ha considerado la presencia de hollín en el monolito del filtro de partículas DPF.

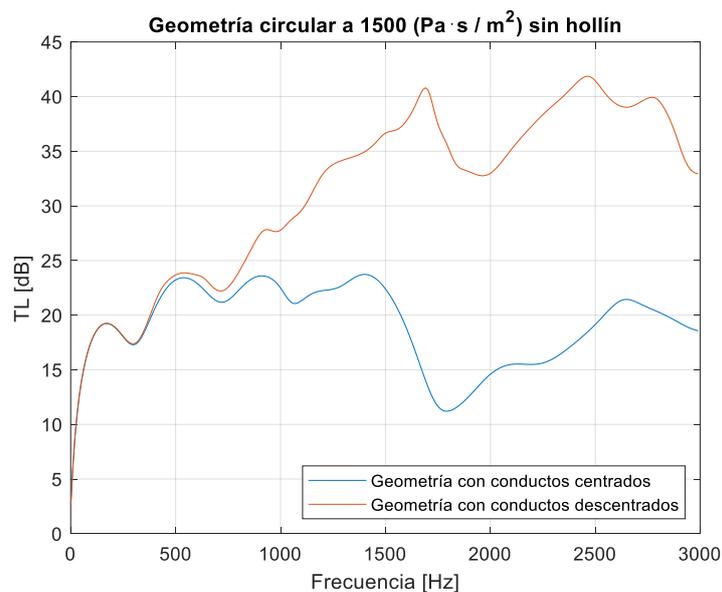


Figura 47: Comparación de la geometría circular sobre la influencia del descentrado.

En la Figura 47 se presenta la comparación de las dos geometrías con las condiciones presentadas, se observa que el conducto descentrado se comporta de manera similar al conducto centrado a bajas frecuencias, pero a partir de los 410 Hz se nota un incremento considerable de TL respecto a la geometría centrada en donde las propiedades disipativas del conducto descentrado se duplica en relación a los conductos centrados.

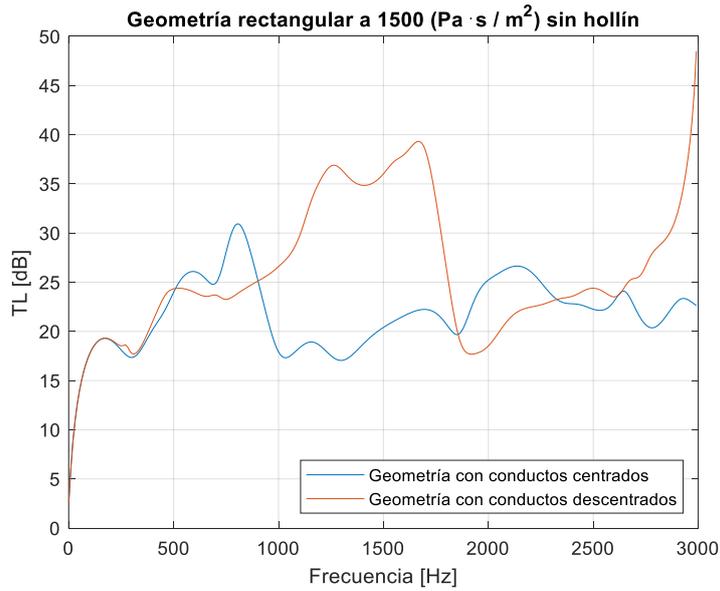


Figura 48: Comparación de la geometría rectangular sobre la influencia del descentrado.

En la geometría rectangular el caso de estudio es similar al de la geometría circular, pero con la diferencia que presenta un offset de 0.0913 m en la cámara de salida.

En la Figura 48 se compara la geometría rectangular centrada frente a la descentrada. Se observa que hasta 400 Hz a bajas frecuencias el comportamiento es similar entre ambas curvas, mientras que a frecuencias medias la influencia del descentrado ha generado un pico de 39 dB a 1900 Hz. A frecuencias altas incrementa ligeramente el TL hasta llegar a los 3000 Hz en donde el valor del TL se dispara, produciendo su pico más alto y por ende aumentando las propiedades disipativas.

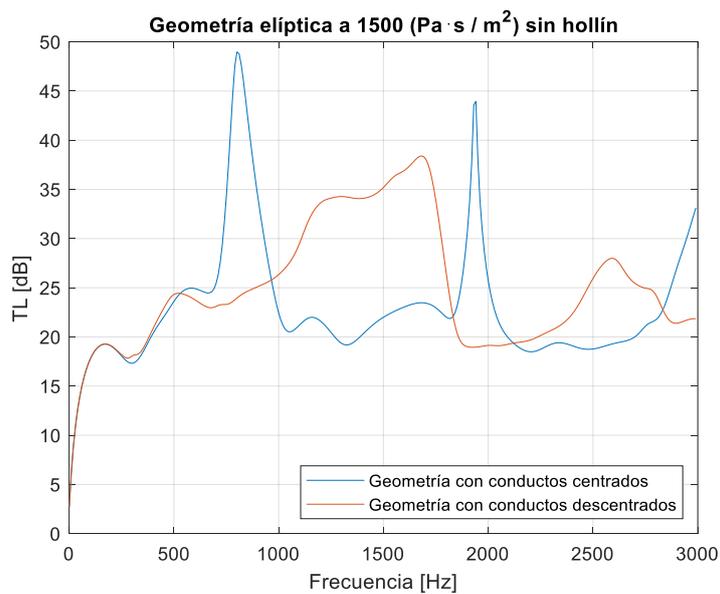


Figura 49: Comparación de la geometría elíptica sobre la influencia del descentrado.

En la Figura 49 se presenta el estudio de la geometría elíptica con las características presentadas anteriormente a diferencia que posee un offset de 0.0828353109 m en la cámara de salida. Se observa que a bajas frecuencias hasta 400 Hz al comparar la pérdida de transmisión son iguales, pero a frecuencias medias se producen dos picos a 820 Hz y a 1900 Hz, alcanzado el pico máximo en la curva con los conductos centrados a 820 Hz con 48 dB.

6.2. INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA RESISTIVIDAD EN CONDUCTOS CENTRADOS SIN LA PRESENCIA DE HOLLÍN

Se establece aumentar la propiedad de la resistividad de $1500 \left(\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right)$ a $3000 \left(\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right)$ en el monolito del catalizador en la geometría con conductos centrados sin considerar la presencia de hollín en el monolito del DPF.

En la Figura 50 se muestra la comparación de aumento de la resistividad de la geometría circular en donde a bajas frecuencias el comportamiento del TL es similar en ambos casos, a partir de los 700 Hz se aprecia la influencia del aumento de la resistividad al presentar un incremento considerable de la disipación acústica en el monolito del catalizador. Después del incremento el TL se desplaza hacia arriba en todo el rango de frecuencias frente al de menor resistividad.

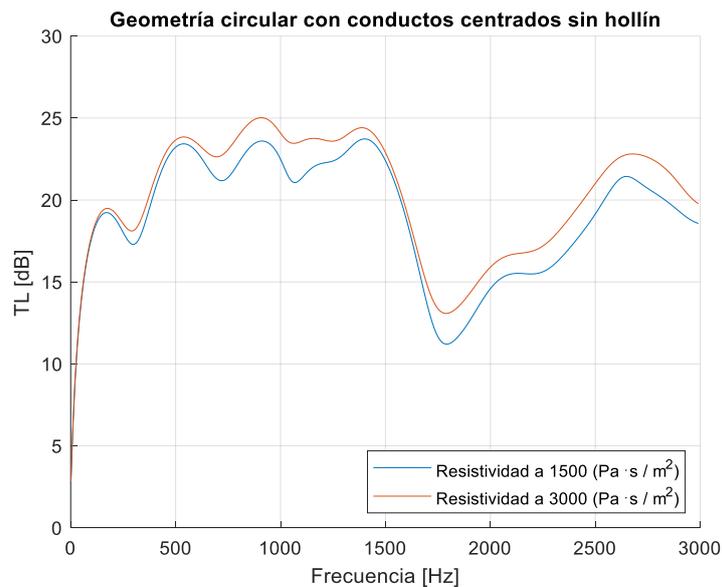


Figura 50: Comparación de la geometría circular sobre el aumento de la resistividad.

Al igual que en el caso anterior en la geometría rectangular de la Figura 51 la curva con el aumento de la resistividad en el monolito de catalizador presenta un mayor incremento en la pérdida de transmisión frente a la curva sin incremento a la resistividad, esta influencia del TL se presenta a medias y altas frecuencias entre 1000 a 3000 Hz en donde supera los valores umbrales. Además, a 800 Hz se observa un pico máximo de TL por parte de la curva con la menor resistividad.

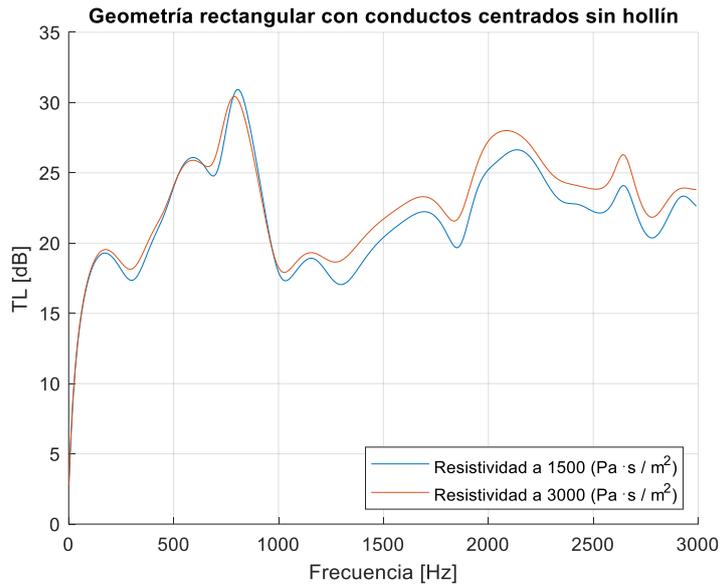


Figura 51: Comparación de la geometría rectangular sobre el aumento de la resistividad.

En la geometría elíptica de la Figura 52 se observa nuevamente la generación dos picos representativos que se ven influenciados al incrementar la resistividad en el monolito del catalizador, estos picos se encuentran a 820 y 1900 Hz, presentado el pico máximo de TL a 62 dB.

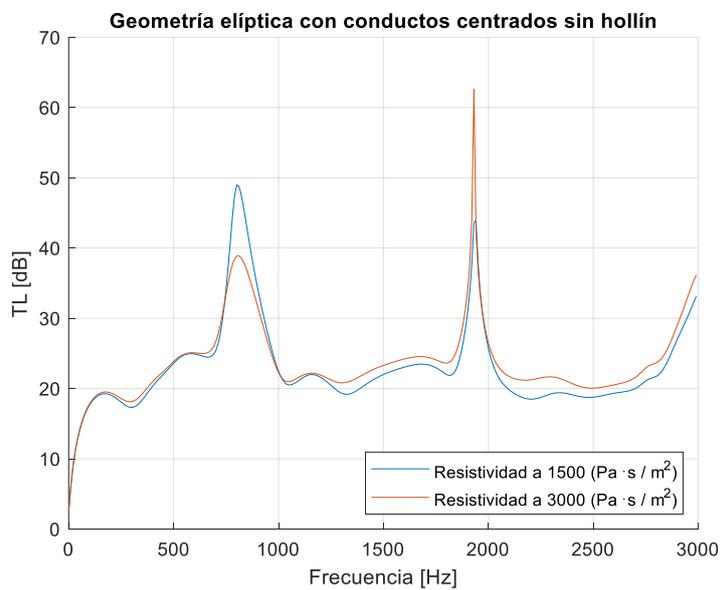


Figura 52: Comparación de la geometría elíptica sobre el aumento de la resistividad.

6.3. INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA RESISTIVIDAD EN CONDUCTOS CENTRADOS CON LA PRESENCIA DE HOLLÍN

Para determinar la influencia del TL se ha considerado la presencia del hollín en el monolito del DPF y el aumento de la resistividad de $1500 \left(\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right)$ a $3000 \left(\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right)$ en el monolito del catalizador con la configuración de los conductos descentrados.

En la Figura 53 se presenta la geometría circular en la cual en ambos casos el comportamiento es similar entre las dos curvas. La curva de color rojo presenta una pequeña subida en el TL a partir de bajas frecuencias por lo que se percibe una mejor disipación acústica de TL durante todo el barrido de frecuencias con respecto a la curva azul.

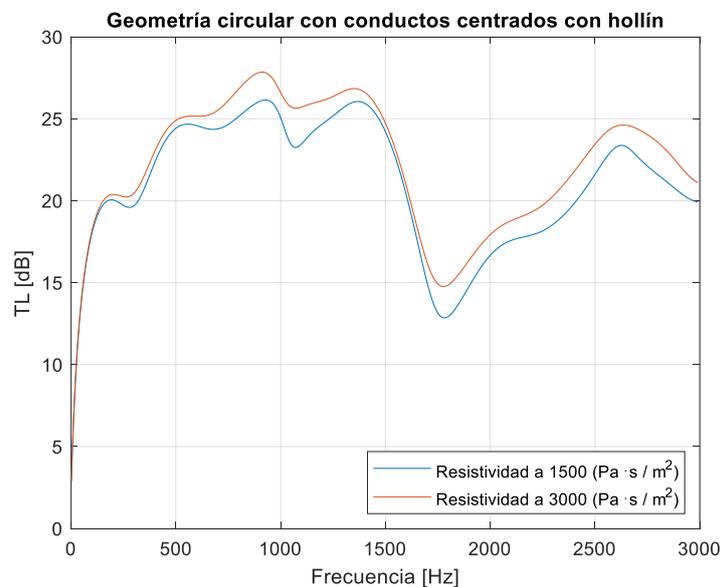


Figura 53: Comparación de la geometría circular sobre aumento de la resistividad y la presencia del hollín.

Similar al estudio anterior para la geometría rectangular en la Figura 54 el comportamiento entre ambas curvas se muestra un gran parecido, asimismo se observa que la curva de color rojo la cual presenta un incremento en la resistividad del monolito aumenta levemente en el TL a partir de los 1000 Hz a lo largo de su trayectoria.

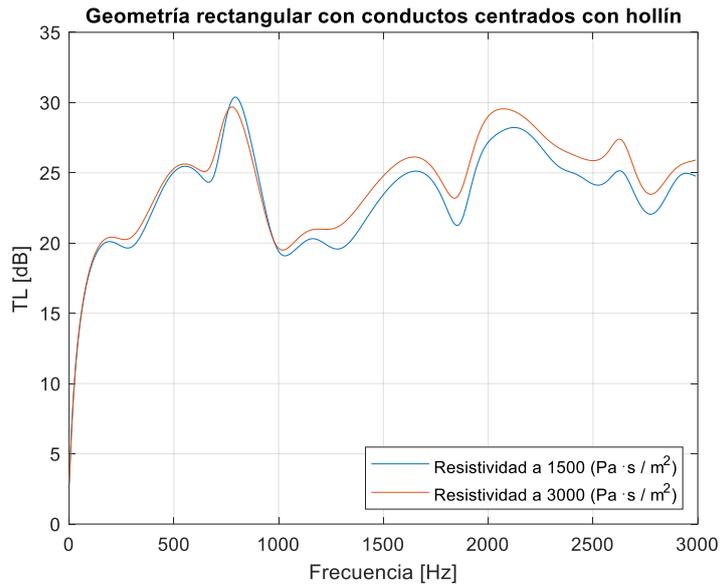


Figura 54: Comparación de la geometría rectangular sobre aumento de la resistividad y la presencia del hollín.

En la Figura 55 se muestra el estudio realizado en la geometría elíptica el cual sigue un comportamiento parecido al de los casos estudiados anteriormente, en la curva con el aumento de resistividad en el monolito del catalizador se observa dos picos característicos a 1900 Hz, el primero se da a 40 dB por parte de la curva que no presenta el aumento de la resistividad, mientras que el pico máximo se da a 47 dB con la curva que presenta la influencia en el aumento de la resistividad.

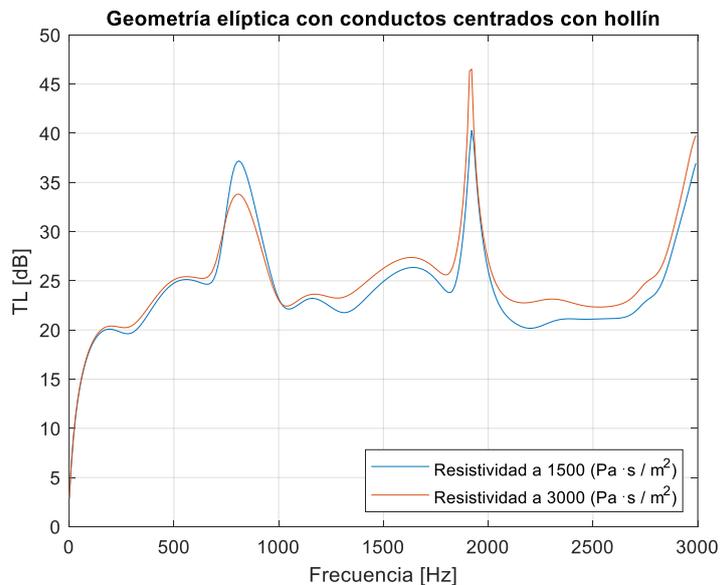


Figura 55: Comparación de la geometría elíptica sobre aumento de la resistividad y la presencia del hollín.

6.4. INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA RESISTIVIDAD EN CONDUCTOS DESCENTRADOS CON LA PRESENCIA DE HOLLÍN

En este caso se establece que en el monolito del DPF exista la presencia de hollín, además del aumento de la resistividad de $1500 \left(\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right)$ a $3000 \left(\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right)$ en el monolito del catalizador y considerando el descentrado de los conductos.

Se muestra en la Figura 56 el comportamiento de la geometría circular en donde la conducta de las dos curvas se observa muy parecidas en el barrido de frecuencias, con la diferencia que a partir de los 220 Hz se presenta un desfase hacia arriba el cual incrementa la respuesta del TL al aumentar la resistividad en el monolito del catalizador.

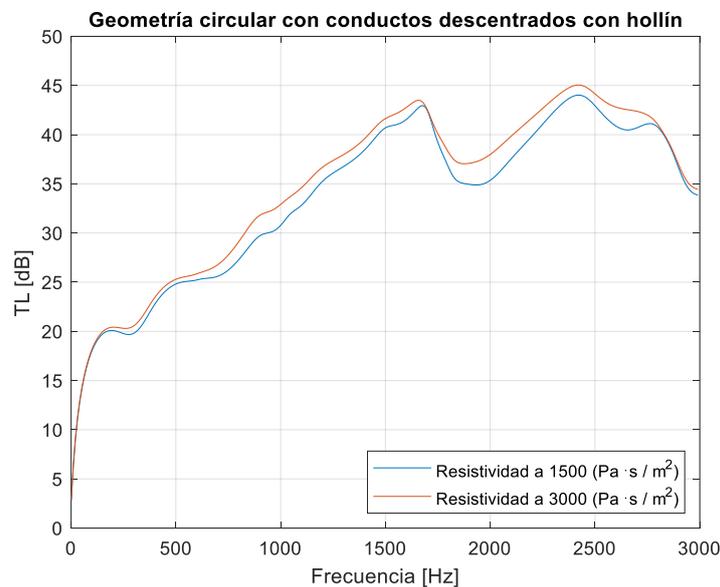


Figura 56: Comparación de la geometría circular sobre aumento de la resistividad, la presencia del hollín y el descentrado de conductos.

Se observa en la Figura 57 la conducta de geometría rectangular como se asemejan ambas curvas a lo largo del incremento frecuencia, en la mayor parte de la trayectoria existe un pequeño incremento del TL, a 1900 Hz se observa un desfase hacia arriba por parte de la curva con el aumento de la resistividad mientras que al finalizar el barrido de frecuencias el TL se dispara la curva con la resistividad menor a los 3000 Hz.

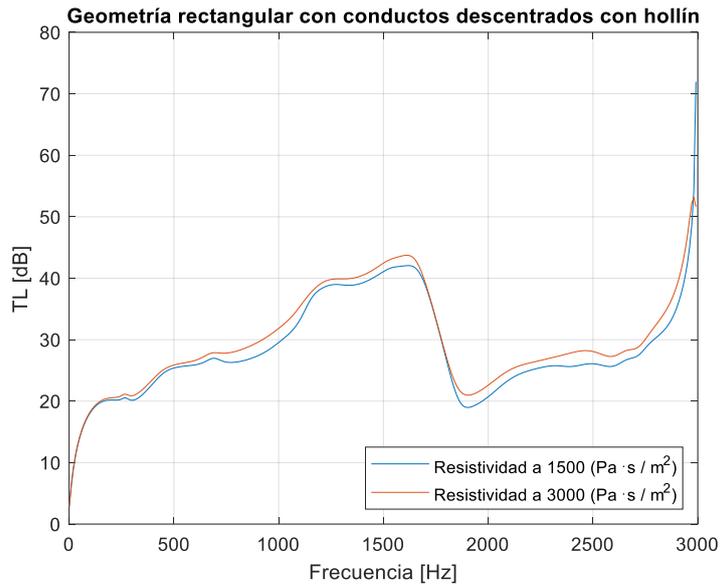


Figura 57: Comparación de la geometría rectangular sobre aumento de la resistividad, la presencia del hollín y el descentrado de conductos.

La conducta que perciben el comportamiento de la geometría elíptica se muestra en la Figura 58, se observa que el aumento de la resistividad en el monolito del catalizador se visualiza un pequeño incremento del TL con respecto a la curva original sobre el descentrado de los conductos principalmente a partir de los 280 Hz.

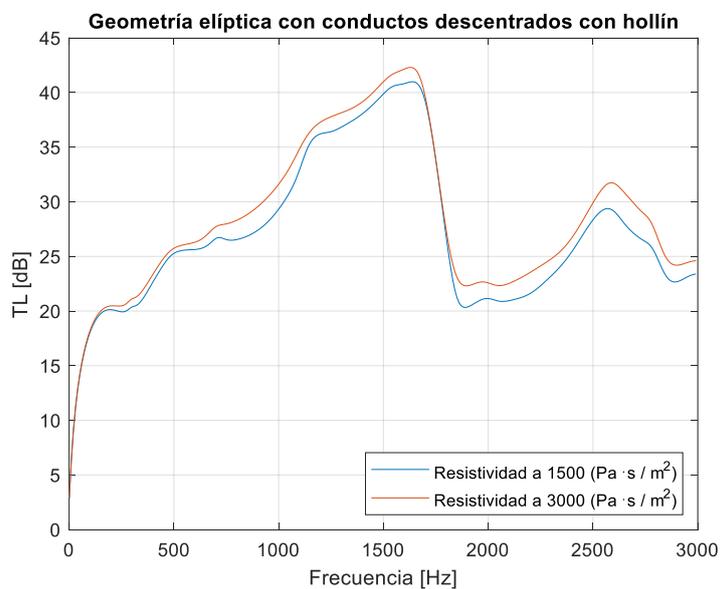


Figura 58: Comparación de la geometría elíptica sobre aumento de la resistividad, la presencia del hollín y el descentrado de conductos.

6.5. INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA LONGITUD EN CONDUCTOS CENTRADOS SIN LA PRESENCIA DE HOLLÍN

Para determinar el comportamiento del TL se ha planteado aumentar al doble la longitud de los monolitos tanto del catalizador como el del filtro de partículas DPF, considerando la geometría con conductos centrados, con una resistividad de $1500 \left(\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} \right)$ en el monolito del catalizador y sin la presencia de hollín sobre el monolito del DPF.

En la Figura 59 se presenta la conducta de TL y la influencia del aumento de las longitudes sobre los monolitos de la geometría circular, el aumento de la pérdida de transmisión es notable en la curva roja al incrementar la longitud los monolitos presentado dos picos significativos a 1000 y a 2600 Hz, el pico máximo se observa a los 1000 Hz con 31 dB, por lo que se espera una mejor atenuación acústica.

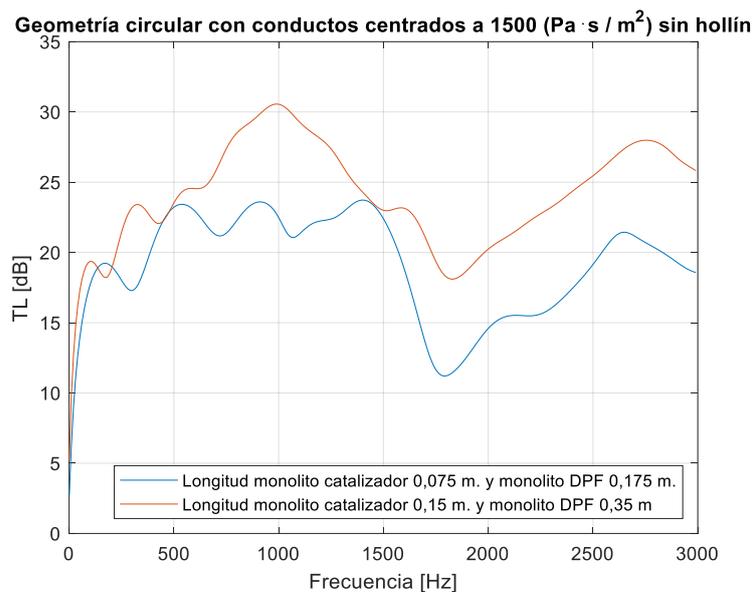


Figura 59: Comparación de la geometría circular centrada sobre el aumento de la longitud en los monolitos.

En la Figura 60 se observa el comportamiento de la geometría rectangular en donde la curva de color rojo con la longitud duplicada en los monolitos representa un amplio incremento de la pérdida de transmisión en este caso, a partir de los 900 Hz se observa una notable subida sobre el TL a lo largo del barrido de frecuencias, pero en particular por el pico generado a 710 Hz en donde presenta el valor máximo de TL a 37 dB.

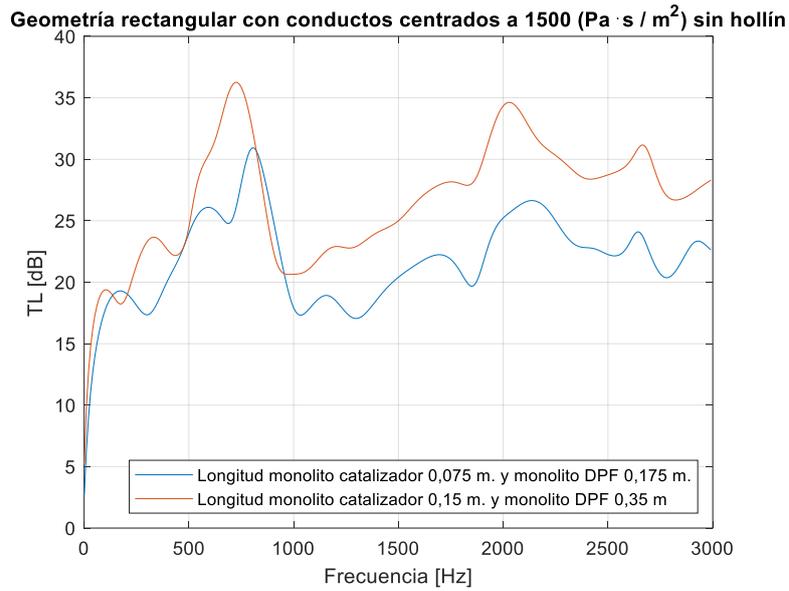


Figura 60: Comparación de la geometría rectangular centrada sobre el aumento de la longitud en los monolitos.

Al igual que en los casos anteriores, al duplicar la longitud de los monolitos se percibe un incremento en la pérdida de transmisión en referencia a la curva inicial, en la Figura 61 se observa la conducta de la geometría elíptica con dos picos característicos a 800 y 1900 Hz por parte de la curva que no presenta el incremento de la longitud en los monolitos, dándose el pico a máximo a 800 Hz con un TL de 48 dB.

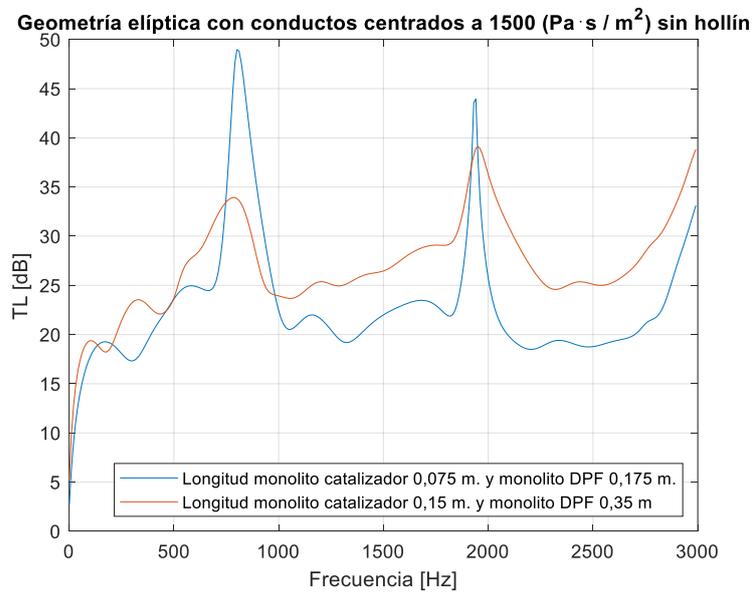


Figura 61: Comparación de la geometría elíptica centrada sobre el aumento de la longitud en los monolitos.

6.6. INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA LONGITUD EN CONDUCTOS DESCENTRADOS SIN LA PRESENCIA DE HOLLÍN

De forma similar que en casos anteriores se estudia la influencia del TL al duplicar la longitud de los monolitos, considerando las geometrías que presentan los conductos descentrados a una resistividad de $1500 \left(\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right)$ en el monolito del catalizador y sin considerar la presencia de hollín en el monolito del filtro de partículas.

En el estudio sobre la geometría circular con conductos descentrados de la Figura 62 se observa un aumento considerable de la pérdida de transmisión en la curva con la longitud duplicada en referencia a la curva original, además se observa que la tendencia entre las dos curvas es parecido durante el barrido de frecuencias.

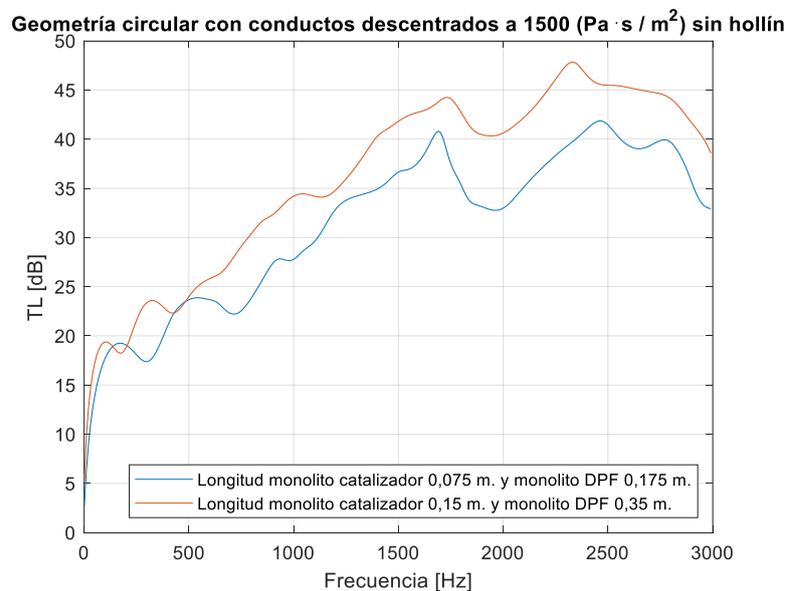


Figura 62: Comparación de la geometría circular con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos.

En la Figura 63 se muestra el estudio realizado para la geometría rectangular en donde al duplicar la longitud del monolito del catalizador y del DPF se consigue un incremento considerable sobre TL a lo largo del barrido de frecuencias, en específico por el pico máximo generado a 1430 Hz con 49 dB representado una gran diferencia frente a la curva original.

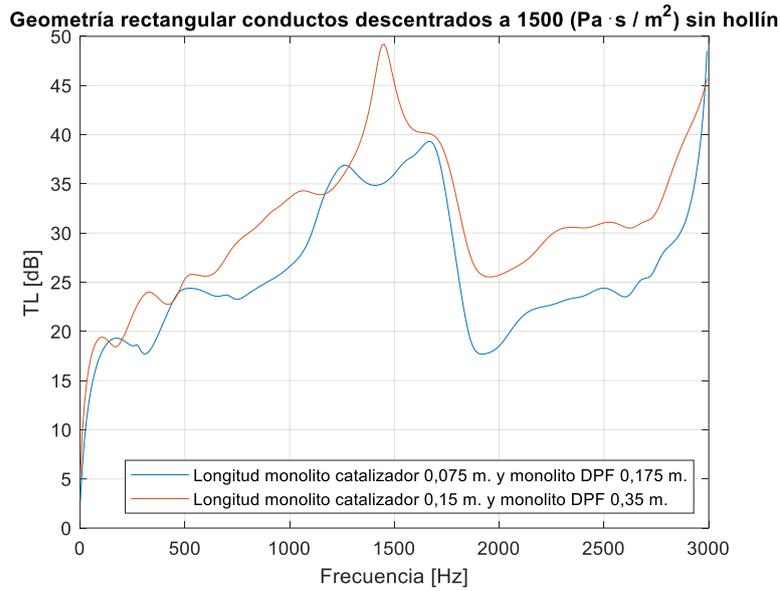


Figura 63: Comparación de la geometría rectangular con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos.

Para el estudio de la geometría elíptica en la Figura 64 la tendencia de la curva con la longitud aumentada percibe un incremento mayor sobre la atenuación acústica en referencia a la curva principal con lo que se ha generado un pico importante a 1420 Hz obteniendo un TL elevado a 44 dB.

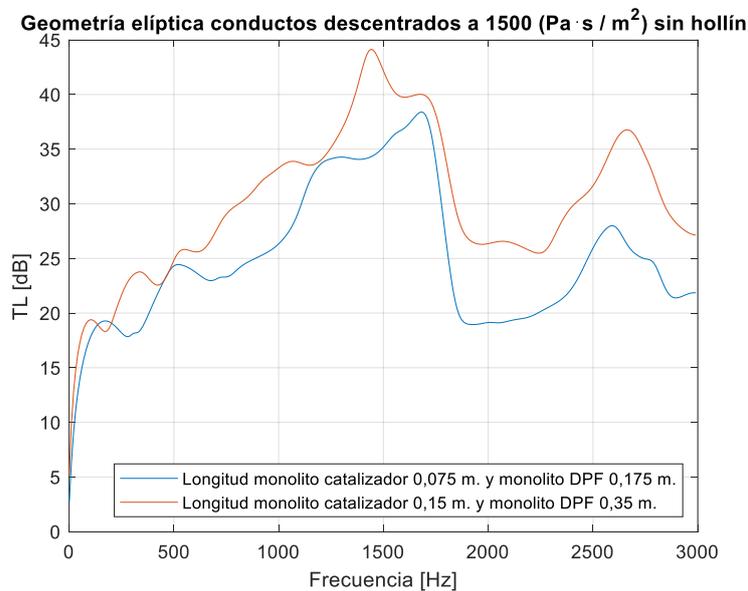


Figura 64: Comparación de la geometría elíptica con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos.

6.7. INFLUENCIA DEL AUMENTO DE LA LONGITUD EN CONDUCTOS DESCENTRADOS CON LA PRESENCIA DE HOLLÍN

En este apartado se considera el aumento del doble de la longitud en los monolitos del catalizador como en el monolito del filtro de partículas, además de ello se ha considerado la presencia de hollín en el monolito del DPF y una resistividad de $3000 \left(\frac{\text{Pa}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} \right)$ en el monolito del catalizador, considerando que los conductos se encuentran descentrados.

En el estudio de la geometría circular de la Figura 65 se observa que la curva con el aumento de longitud en sus monolitos es superior con respecto a la curva inicial, además se observa que la tendencia entre las dos curvas se comportan de manera similar a lo largo del barrido de frecuencias con un desfase considerable hacia arriba. El pico máximo se produce a 2400 Hz con un TL de 52 dB.

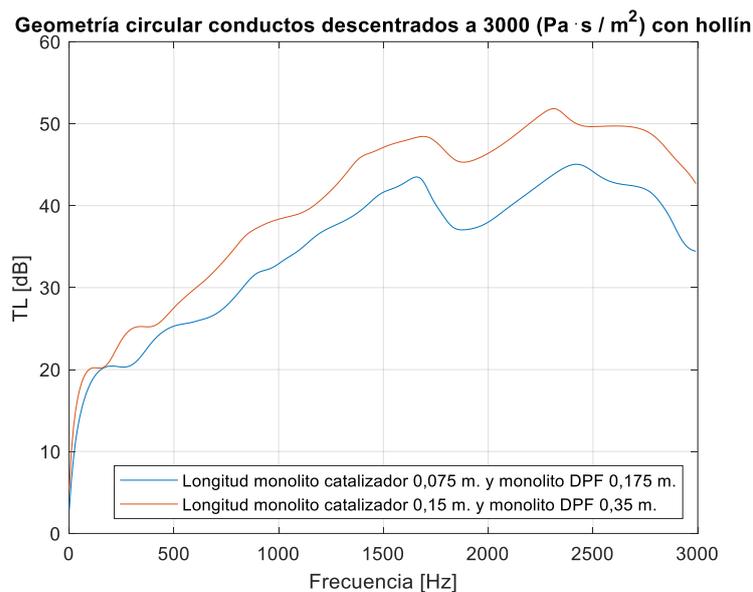


Figura 65: Comparación de la geometría circular con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos con presencia de hollín.

La geometría rectangular de la Figura 66 mantiene la conducta de los casos anteriores en donde la curva roja con el aumento de la longitud en los monolitos presenta un incremento significativo frente a la inicial. Se observa un pico importante a los 1430 Hz con un TL de 53 dB.

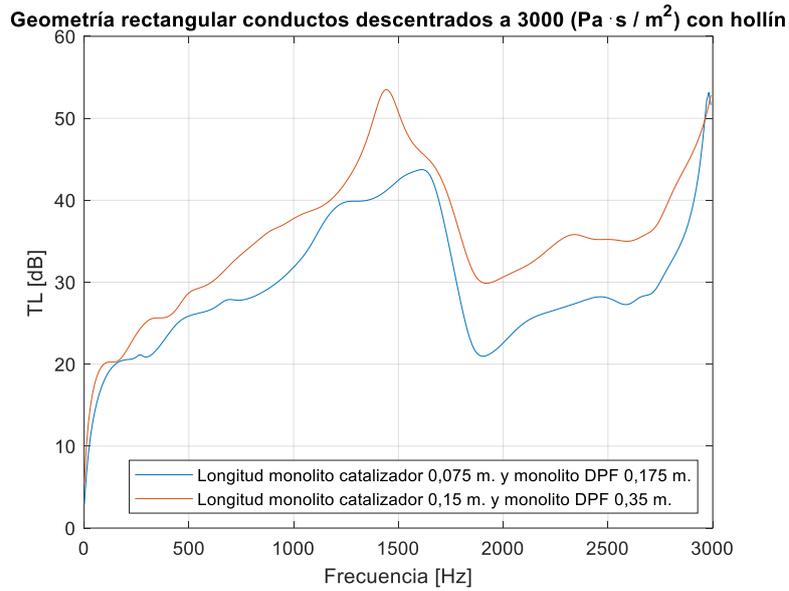


Figura 66: Comparación de la geometría rectangular con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos con presencia de hollín.

La Figura 67 presenta el comportamiento de la geometría elíptica con respecto al estudio del incremento de la longitud de los monolitos al duplicar su dimensión original, se observa que en la curva de color rojo el TL percibe un incremento considerable presentando el valor máximo a 49 dB a una frecuencia de 1420 Hz.

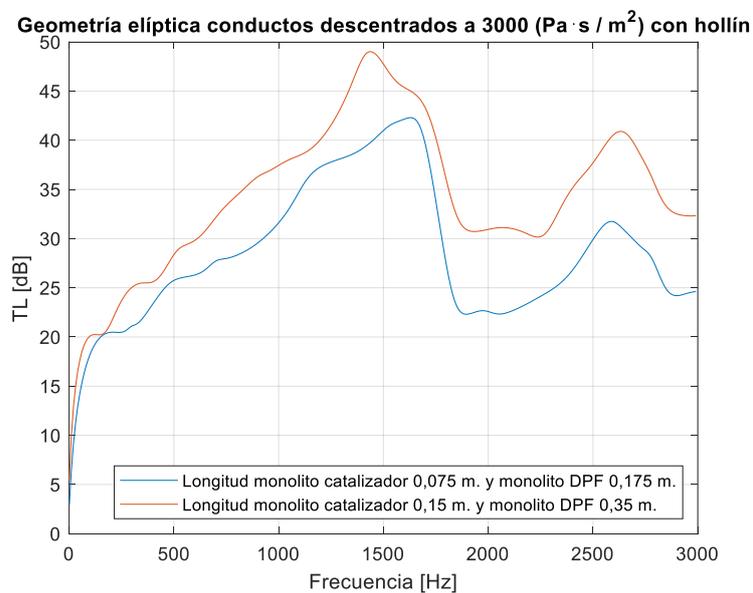


Figura 67: Comparación de la geometría elíptica con conductos descentrados sobre el aumento de la longitud en los monolitos con presencia de hollín.

7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

7.1. CONCLUSIONES

El método de los elementos finitos permite determinar las prestaciones de atenuación sonora de dispositivos postratamiento con monolitos (catalizador y filtro de partículas) de la línea de escape de un motor de combustión interna alternativo al realizar un estudio paramétrico detallado mediante la modificación de propiedades en los monolitos, configuraciones de geometría, presencia de hollín y la variación de la resistividad a través del software comercial ANSYS en sus versiones APDL y WORKBENCH.

Los resultados se obtienen mediante el desarrollo e implementación de múltiples casos de estudio con la utilización del método de elementos finitos al calcular el índice de la pérdida de transmisión TL. El desarrollo de una metodología detallada en el contexto del software ANSYS permite validar el estudio con el uso de las interfaces tanto en APDL como en WORKBENCH obteniéndose un error inferior al 1%.

Los monolitos tanto de catalizador como de filtro de partículas cuentan con capilares en su interior los cuales son reemplazados por una matriz de transferencia de cuatro polos en donde se relacionan las características acústicas de los monolitos en función de la frecuencia, temperatura y propiedades como la resistividad y porosidad. La matriz de transferencia permite establecer una relación entre el puerto de entrada y salida de las secciones de los monolitos que conforman la línea de escape a través de la presión y velocidad acústica.

En base a trabajos y publicaciones anteriores del grupo de investigación en el que se integra el presente Trabajo Fin de Máster, se establece que los monolitos presenten un modelo de propagación de onda 1D, mientras que el resto de cámaras y conductos se estudia como un modelo de propagación 3D desde el punto de vista acústico, resultando un modelo propagación de 3D/1D.

En el estudio de la influencia de la geometría con conductos centrados frente a conductos descentrados se observa que el comportamiento a bajas frecuencias es similar para todos los casos estudiados. Al llegar aproximadamente a los 500 Hz aparecen fluctuaciones con lo cual la curva con la geometría con conductos descentrados incrementa significativamente respecto a la inicial hasta obtener los picos

máximos de la pérdida de transmisión en todas las geometrías, a excepción de la geometría elíptica en donde a frecuencias medias se presentan dos picos máximos en la curva con conductos centrados. Este incremento del TL en las configuraciones con conductos descentrados se debe a que la distancia de descentrado se ha calculado para que el conducto de salida caiga sobre la línea nodal (o de presión nula) del primer modo transversal de orden superior. Esto permite lograr un nivel mejorado de TL respecto al caso centrado, al haber ubicado el conducto de salida en una zona de baja presión acústica.

En cuanto al estudio de la influencia del aumento de la resistividad en conductos centrados sin la presencia de hollín se observa que la conducta a bajas frecuencias es similar en todos los casos de estudio. La geometría circular y elíptica presentan sus picos máximos a frecuencias medias al aumentar la resistividad en el monolito del catalizador mientras que en la geometría rectangular presenta su pico máximo a través de la curva con inferior resistividad. En términos generales, se aprecia que a mayor resistividad da lugar a un mayor TL a lo largo del barrido de frecuencias.

En los estudios tanto de la influencia del aumento de la resistividad en conductos centrados con la presencia de hollín como en la influencia del aumento de la resistividad en conductos descentrados con la presencia de hollín se denota gran similitud en la conducta de las tres geometrías, sin embargo, al incrementar la propiedad de resistividad en el convertidor catalítico se observa un mayor valor de TL a lo largo de todo el barrido de frecuencias frente la curva original.

Cuando se analiza la influencia del aumento de la longitud en conductos centrados sin la presencia de hollín se observa un incremento notable de la pérdida de transmisión a en todo el barrido de frecuencias en las geometrías circular y rectangular. En las zonas de frecuencias medias se produce el pico máximo de TL consiguiendo así la mayor atenuación en esa zona para las geometrías. En el caso de la geometría elíptica se observa que el valor máximo de TL se produce a frecuencias medias por parte de la curva sin el aumento de la longitud. Por lo general, se observa que la presencia de hollín en la trampa de partículas da lugar a un mayor TL.

El estudio de la influencia del aumento de la longitud en conductos descentrados con la presencia de hollín se obtiene un aumento considerable de TL en todo el rango de frecuencias con la presencia de picos significativos a medias y altas frecuencias en todas las geometrías. En términos generales, en este trabajo se asume que cuanto mayor sea la pérdida de transmisión (TL) en un sistema, sus prestaciones en términos de reducción de emisiones y contaminación acústica serán mejores.

7.2. DESARROLLOS FUTUROS

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo del Trabajo de Fin de Máster se plantean posibles temas de investigación referentes a la aplicación del estudio del campo acústico en motores de combustión interna alternativos:

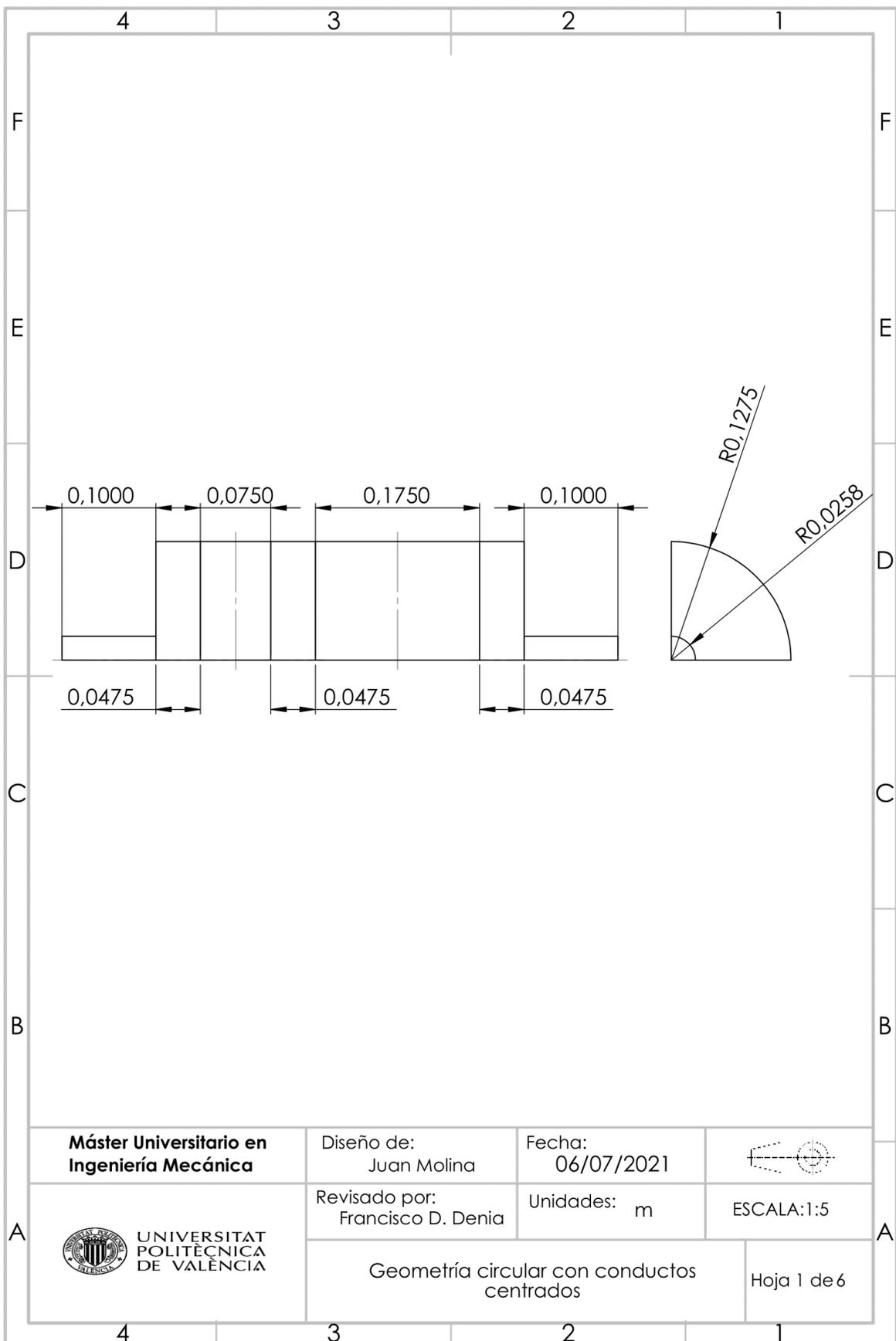
- Se puede abordar el estudio del comportamiento de la línea de escape con su disposición completa incluyendo catalizador, trampa de partículas y silenciadores como un posible trabajo futuro. Asimismo, al estudiar el comportamiento del sistema al modificar sus propiedades y configuraciones de geometría.
- En el TFM se ha analizado el comportamiento del campo acústico como un flujo frío debido a que el estudio se llevó a cabo con una temperatura constante de 15 °C. Una posibilidad de estudio se enfocará en determinar el efecto de la temperatura en el campo acústico de los motores de combustión interna alternativos. De esta manera se puede estimar el comportamiento más realista de los MCIA en condiciones de trabajo similares a las de funcionamiento.

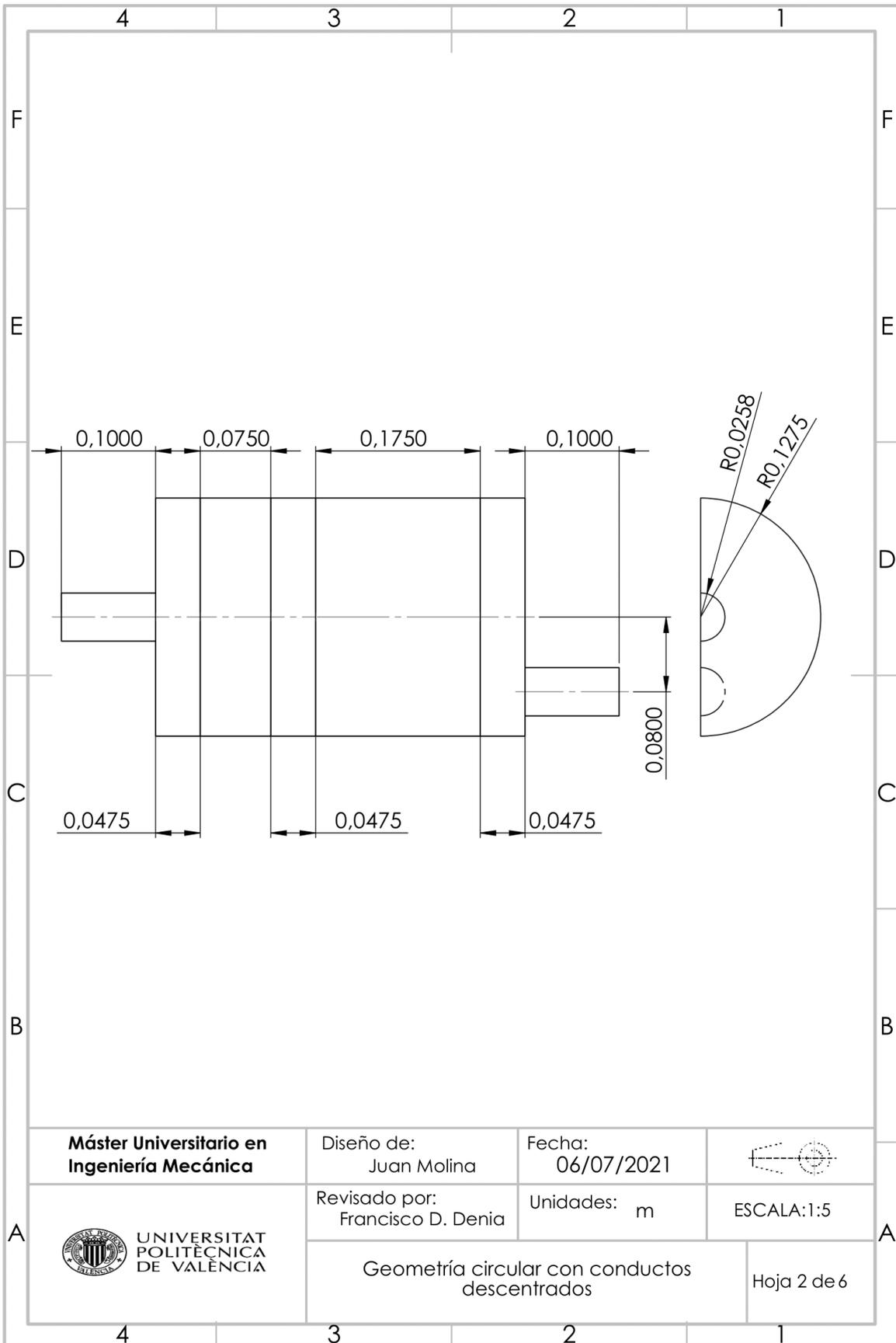
8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Meseguer J, Keong T. C., Calafate C. T., Cano J., & Manzoni P., Assessing the Impact of Driving Behavior on Instantaneous Fuel Consumption, 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2015.
- [2] Bowen, C.E., Reader, G.T. & Potter, I.J., The effect of exhaust gas recirculation on the combustion noise level of an indirect injection diesel engine, IEEE, 2002.
- [3] Denia, F.D., Albelda, J., Fuenmayor, F.J., & Torregrosa, A.J., Acoustic behaviour of elliptical chamber mufflers, *Journal of Sound and Vibration*, 241, 401-421, 2001.
- [4] Revilla, D., Desarrollo e implementación de metodologías numéricas de caracterización del comportamiento acústico de catalizadores de MCI mediante elementos finitos, RiuNet (TFM, Universitat Politècnica de València), 2021.
- [5] Juárez, P., Diseño de una metodología para la modelización acústica 3D mediante E.F de dispositivos con monolito en sistemas de escape de vehículos. Aplicación a filtros de partículas diésel, RiuNet (TFM, Universitat Politècnica de València), 2020.
- [6] Tortosa, G., Modelado analítico y numérico del comportamiento acústico de dispositivos de la línea de escape en vehículos. Aplicación a sistemas catalizador/trampa de partículas, RiuNet (TFM, Universitat Politècnica de València), 2020.
- [7] Conceptos básicos del ruido ambiental, 2020. [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/contaminacion_acustica_tcm30-185098.pdf.
- [8] Denia, F.D., La ecuación de ondas, *Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales UPV*, (2020).
- [9] Sánchez, E. Profesional, MACMILLAN, Sistemas Auxiliares del Motor, 2008.
- [10] Allam, S. & Abom, M., Acoustic modelling and testing of diesel particulate fillters, *Journal of sound and vibration*, Volume 288, pp 255-273, 2004.

- [11] Pelayo, C., Modelado y simulación acústica 3D mediante Comsol de dispositivos de la línea de escape en vehículos. Aplicación a catalizadores, RiuNet (TFM, Universitat Politècnica de València), 2016.
- [12] Selamet, A., Easwaran, V., Novak, J., & Kach, R, Wave attenuation in catalytic converters: Reactive versus dissipative effects., Journal of the Acoustic Society of America, Volume 103, pp. 935-943, 1998.
- [13] Denia, F.D., Martínez-Casas, J., Baeza, L., & Fuenmayor, F.J, Acoustic modelling of exhaust devices with non-conforming finite element meshes and transfer matrices, Applied Acoustics, Volume 73, pp. 713-722, 2012.
- [14] Denia, F.D., Antebas, A.G., Kirby, R., & Fuenmayor, F.J, Multidimensional acoustic modelling of catalytic converters, 16th International Congress of Sound and Vibration. Cracovia, 2009.
- [15] Sánchez, E., Denia, F.D., Ferrándiz, B., Martínez-Casas, J., & Nadal, E., Optimización acústica de catalizadores de automoción, Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, pp. 112-125, Guimaraes, 2019.
- [16] Konstandopoulos, A. G. & Johnson, J. H., Wall-flow diesel particulate filters-their pressure drop and collection efficiency, En: SAE Technical paper No. 89040 (pp. 28, 29, 33), 1989.
- [17] Masoudi, M. & col, Predicting pressure drop of wall-flow diesel particulate filters - theory and experiment. En: SAE Technical paper 2000-01-0184 (pp. 28, 33), 2000.
- [18] Pierce, A.D., ACOUSTICS: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, New York: second ed., Journal of the Acoustical Society of America, 1991.

9. PLANOS





Máster Universitario en
Ingeniería Mecánica

Diseño de:
Juan Molina

Fecha:
06/07/2021



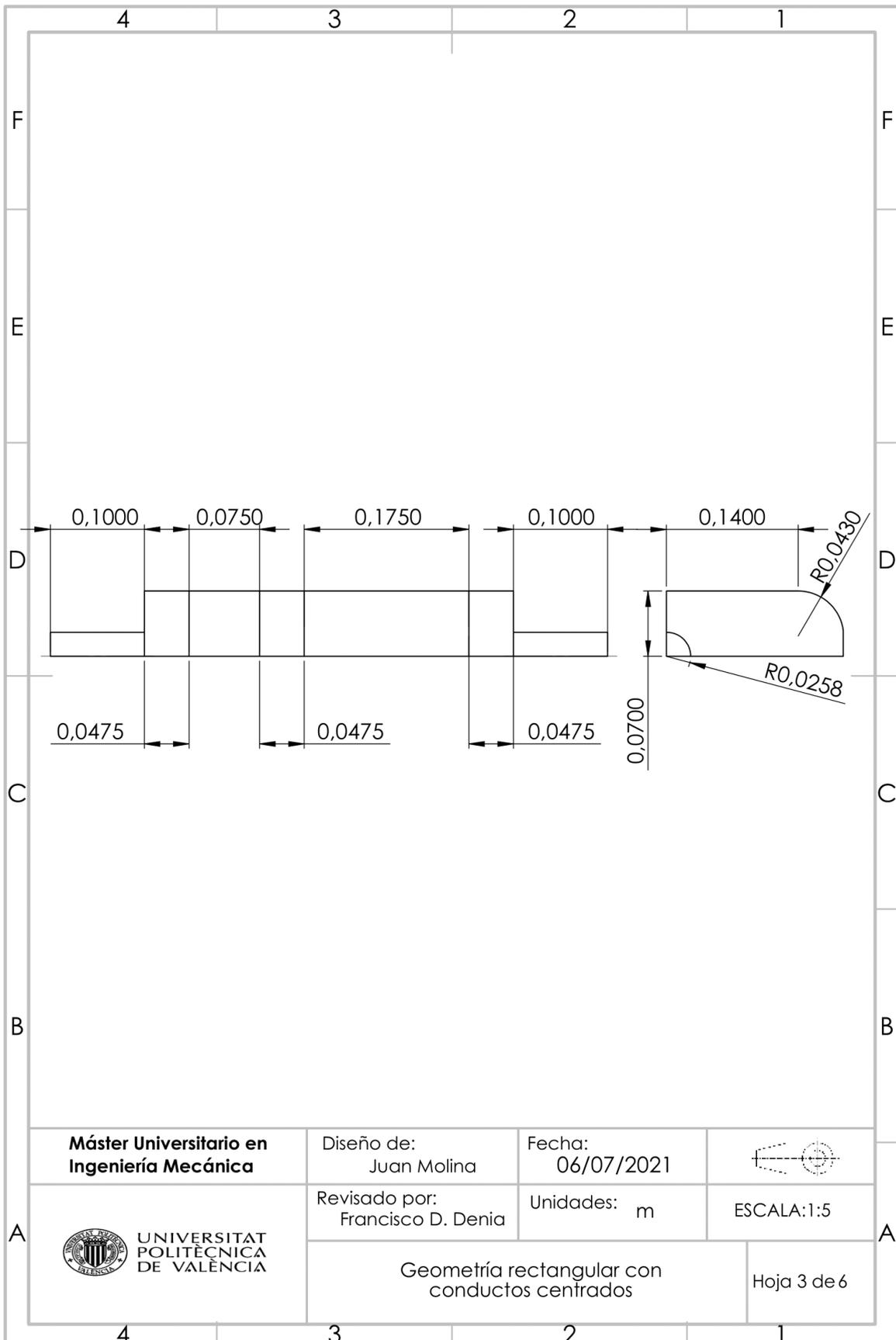
Revisado por:
Francisco D. Denia

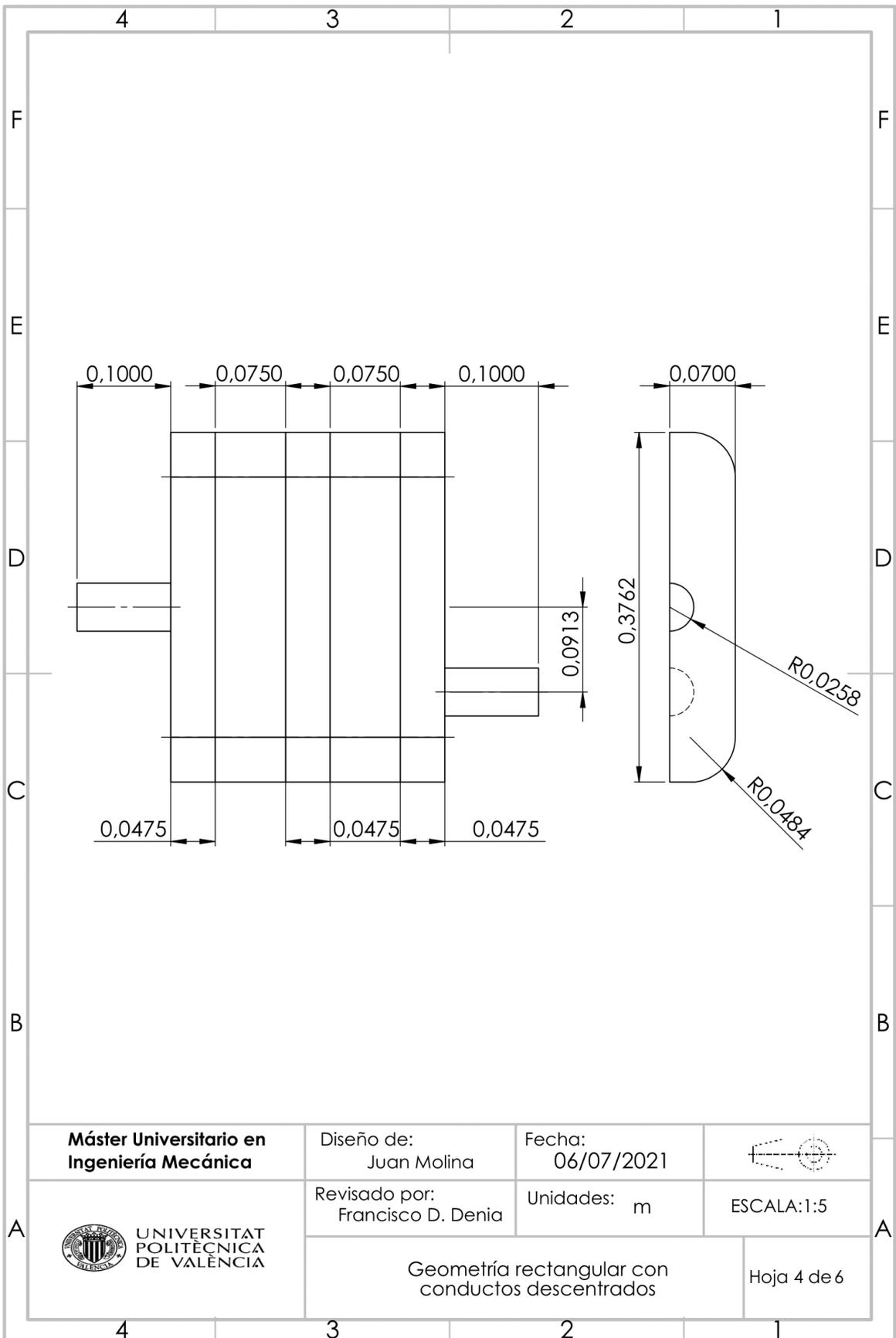
Unidades: m

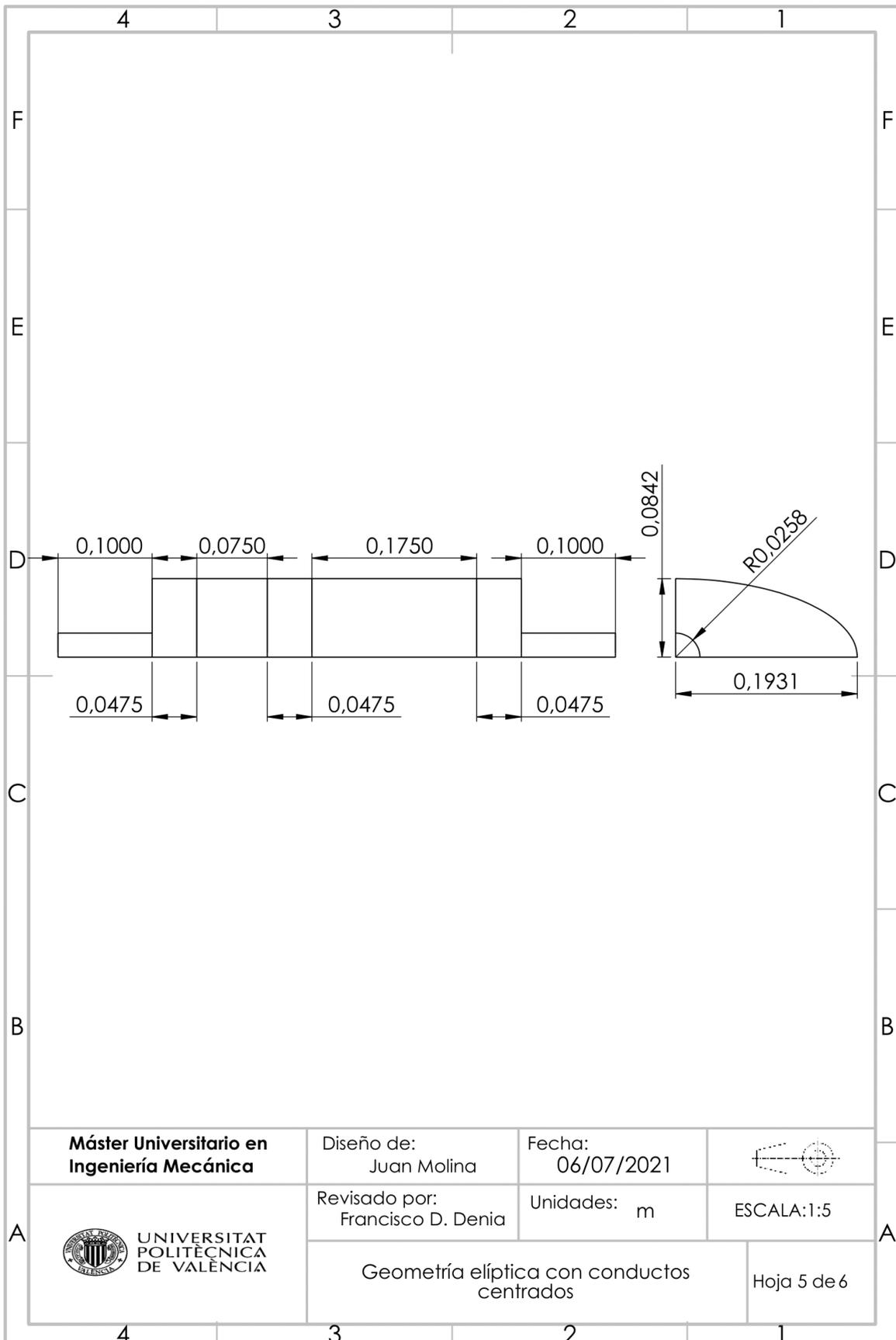
ESCALA:1:5

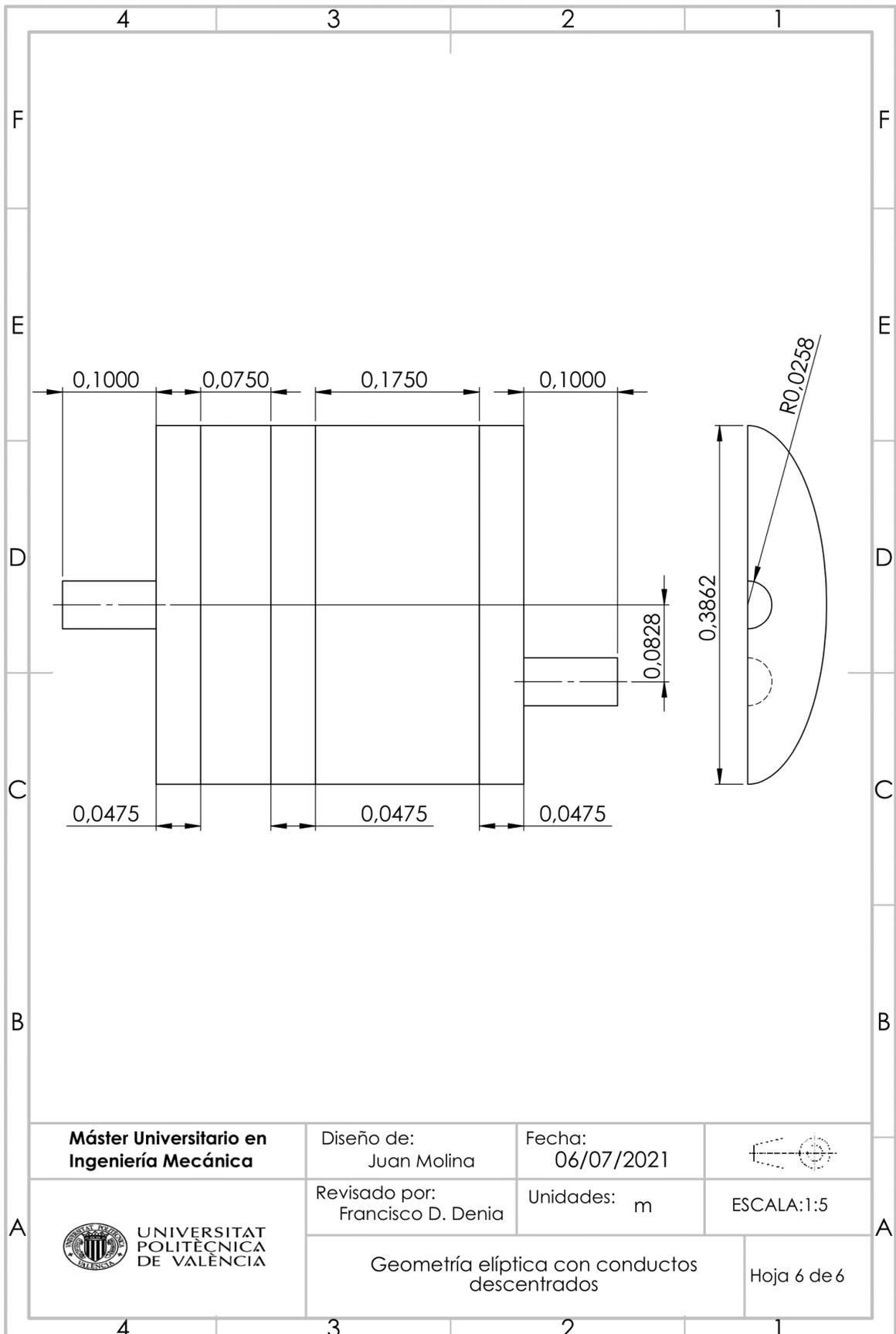
Geometría circular con conductos
descentrados

Hoja 2 de 6





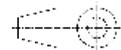




Máster Universitario en
Ingeniería Mecánica

Diseño de:
Juan Molina

Fecha:
06/07/2021



A



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA

Revisado por:
Francisco D. Denia

Unidades: m

ESCALA:1:5

A

Geometría elíptica con conductos
descentrados

Hoja 6 de 6

4

3

2

1

10. ANEXOS

10.1. ANEXO 1: FICHERO DE MATLAB PARA LAS PROPIEDADES DEL CATALIZADOR

```
clear all

load variab

% Monolito de catalizador (modelo 3D conductos/1D monolito).
%
=====
==

lc=variab(6); % Longitud del monolito

% Frecuencias de análisis
% =====

fini=variab(1); % frecuencia inicial
ffin=variab(2); % frecuencia final
deltaf=variab(3); % Incremento de frecuencia

%
=====
%
=====

% Propiedades del aire
%
=====
%
=====

temp=variab(13); % Temperatura (°C)
if temp==-1 % Se introducen los valores directamente
    caire=variab(4); % Velocidad del sonido en el aire
    rhoaire=variab(5); % Densidad del aire
end
if temp~-1 % Se calculan en función de la temperatura
    caire = (1.4*8.314*(temp+273.15)/0.02897)^0.5;
    rhoaire = 101325*0.02897/(8.314*(temp+273.15));
end
%
=====
%
=====

% Propiedades del monolito. Modelo de Allard
```

```

%
=====
%
=====
resis=variab(7); % Resistividad del monolito (realmente debería ser función de la
temperatura)
poro=variab(8); % Porosidad del monolito
alpha=variab(9); % Factor geométrico del capilar
if temp==-1 % Se introducen los valores directamente
    visco=variab(10); % Viscosidad
    kappa=variab(11); % Conductividad térmica
    Cp=variab(12); % Calor específico a presión constante
end
if temp~-1 % Se calculan en función de la temperatura
    visco = 1.458e-6*(temp+273.15)^1.5/(temp+273.15+110.4) ; % Ecuación de
Sutherland; viscosidad dinámica
    kappa = 0.023635+7.562892e-5*temp-2.523277e-8*temp^2+4.648739e-12*temp^3;
% Conductividad térmica. Ajuste con Mathcad entre 0°C y 1000 °C
    Cp = 1.00734e3-0.059809*temp+8.879379e-4*temp^2-1.055691e-
6*temp^3+4.044381e-10*temp^4; % Calor específico a presión constante. Ajuste con
Mathcad entre 0°C y 1000 °C
end
prandtl=visco*Cp/kappa; % Número de Prandtl

% Barrido en frecuencia
% =====

monolito=fopen('matriz_cc.txt','w');

NB=(ffin-fini)/deltaf+1;

for nf=1:NB

    frec=deltaf*(nf-1)+fini;
    w=2*pi*frec;
    'Frecuencia ='
    frec
    kaire=w/caire; % Número de onda del aire

    % ---- Caracterización del monolito. Modelo de Allard

    rj=(-1j)^0.5;
    ss=alpha*(8*w*rhoaire/(resis*poro))^0.5;
    gc1=(-ss/4*rj*besselj(1,ss*rj)/besselj(0,ss*rj))/(1-
2/(ss*rj)*besselj(1,ss*rj)/besselj(0,ss*rj));

```

```

    rhom=rhoaire+resis*poro*gc1/(1j*w); % Densidad acústica equivalente del
monolito
    sss=ss*(prandtl)^0.5;
    gc2=(-sss/4*rj*besselj(1,sss*rj)/besselj(0,sss*rj))/(1-
2/(sss*rj)*besselj(1,sss*rj)/besselj(0,sss*rj));
    denomin=((1+poro*resis*gc1/(1j*w*rhoaire))*(1.4-(1.4-
1)/(1+poro*resis*gc2/(1j*w*rhoaire*prandtl))))^0.5;
    cm=caire/denomin; % Velocidad del sonido equivalente del monolito
    km=w/cm; % Número de onda equivalente del monolito

% ---- Cuatro polos de la matriz de transferencia para conectar las dos caras del
monolito

T11=cos(km*lc);
T12=1j*rhom*cm*sin(km*lc)/poro;
T21=1j*poro*sin(km*lc)/(rhom*cm);
T22=cos(km*lc);

% ---- Cálculo de matriz de admitancia
%
% u1=T21*p2+T22*u2=T22/T12*p1+(T21-T22*T11/T12)*p2
% u2=p1/T12-T11/T12*p2
% u2=(-1/T12)*p1+(T11/T12)*p2 % Cambio de signo

y11r=real(T22/T12);
y11i=imag(T22/T12);
y12r=real(T21-T22*T11/T12);
y12i=imag(T21-T22*T11/T12);
y21r=real(-1/T12);
y21i=imag(-1/T12);
y22r=real(T11/T12);
y22i=imag(T11/T12);

% Escritura de fichero para Ansys
%
% tb,perf,2,,ymat
% tbfield,freq,frequ
% tldata,1,y11r,y11i,y12r,y12i,y21r,y21i
% tldata,7,y22r,y22i
%
fprintf(monolito,'%s','tbfield,freq,');
fprintf(monolito,'%i\r\n',freq);
fprintf(monolito,'%s','tldata,1,');
fprintf(monolito,'%10e',y11r); fprintf(monolito,'%s','');
fprintf(monolito,'%10e',y11i); fprintf(monolito,'%s','');

```

```
fprintf(monolito,'%10e',y12r); fprintf(monolito,'%s',',');  
fprintf(monolito,'%10e',y12i); fprintf(monolito,'%s',',');  
    fprintf(monolito,'%10e',y21r); fprintf(monolito,'%s',',');  
fprintf(monolito,'%10e\r\n',y21i);  
    % Continúa  
    fprintf(monolito,'%s','tbddata,7,');  
    fprintf(monolito,'%10e',y22r); fprintf(monolito,'%s',',');  
fprintf(monolito,'%10e\r\n',y22i);  
  
end % Fin del barrido en frecuencia  
  
fclose(monolito);
```

10.2. ANEXO 2: FICHEROS DE MATLAB PARA LAS PROPIEDADES DEL FILTRO DE PARTÍCULAS

```
%Principal

clear all

% =====
% MODELO DE MONOLITO: Allam y Abom, Journal of Sound and Vibration, 2005, 2006
% Modelo con flujo (solamente efecto en cambios de sección)
% =====
% Trampa de partículas - DPF; monolito (modelo 3D/1D).
% Generación de tablas de Ansys.
%
=====
==

% Definición de variables del problema
% =====

load variab

lc=variab(6); % Longitud del monolito

%=====
% Número de Mach (solamente efecto local en entrada y salida de capilares)
%=====
%
M_IN=variab(7); % Corresponde al valor de la cámara contigua al monolito

% Definición de variables del problema
% =====

% Frecuencias de análisis
% =====

fini=variab(1); % frecuencia inicial
ffin=variab(2); % frecuencia final
deltaf=variab(3); % Incremento de frecuencia

%
=====
%
=====

% Propiedades del aire y del monolito
```

```

%
=====
%
=====
Temp=variab(14); % Temperatura (°C)

monolito_2 % Ver código

% Barrido en frecuencia
% =====

monolito=fopen('matriz_dpf.txt','w');

monolito_3 % Ver código (extraído de programa de ajuste_modal)

fclose(monolito);

```

```

                                %monolito_2

% =====
% MODELO DE MONOLITO: Allam y Abom, JSV, 2005, 2006
% Modelo con flujo (solamente efecto en cambios de sección)
% =====

% Gas perfecto
gamma=1.4;
Rgas=8.314;
Mm=0.02897;
Patm=101325;

if Temp==-1 % Se introducen los valores de las propiedades directamente; no se
calculan en función de la temperatura.
    c0ini=variab(4); % Velocidad del sonido en el aire
    rho0ini=variab(5); % Densidad del aire
    Z0ini=rho0ini*c0ini; % Impedancia característica
    mu=variab(11); % Viscosidad
    cond=variab(12); % Conductividad térmica
    cp=variab(13); % Calor específico a presión constante
end

if Temp~-1 % Se calculan las propiedades en función de la temperatura.
    c0ini=sqrt(gamma*Rgas*(Temp+273.15)/Mm); % Velocidad del sonido. En los
capilares se modifica con la teoría de Kirchhoff
    rho0ini=Patm*Mm/(Rgas*(Temp+273.15)); % Densidad del aire. En los capilares se
modifica con la teoría de Kirchhoff
    Z0ini=rho0ini*c0ini; % Impedancia característica

```

```

mu=1.45793*10^-6*(Temp+273.15)^1.5/(Temp+273.15+110.4); % Viscosidad
dinámica (Sutherland)
cond = 0.023635+7.562892e-5*Temp-2.523277e-8*Temp^2+4.648739e-
12*Temp^3; % Ajuste con Mathcad entre 0°C y 1000 °C
cp = 1.00734e3-0.059809*Temp+8.879379e-4*Temp^2-1.055691e-
6*Temp^3+4.044381e-10*Temp^4; % Ajuste con Mathcad entre 0°C y 1000 °C
end
prandtl=mu*cp/cond; % Número de Prandtl

% Tipo y área del monolito (Tabla 2 de artículo de Allam y Abom, Journal of Sound and
Vibration, 2005).

Tipo_m=variab(8);
Am=variab(9); % Área total del monolito (influye en resultados intermedios, no en el
final al trabajar con canales/m^2).

if Tipo_m==1
% Tipo 1 (EX 200/14)
dh=0.00144; % Dimensión canal (lado)
ht=0.000355; % Espesor canal (pared porosa)
sigmaw=2.5*10^-13; % Permeabilidad (pared porosa)
lX=0.005; % Longitud de extremos (end correction - mass plug). Valor supuesto.
n=3.1*10^5; % Canales por metro cuadrado; Para este tipo es consistente con el
valor 200
end

if Tipo_m==2
% Tipo 2 (EX 100/17)
dh=0.00211; % Dimensión canal (lado)
ht=0.00043; % Espesor canal (pared porosa)
sigmaw=2.5*10^-13; % Permeabilidad (pared porosa)
lX=0.005; % Longitud de extremos (end correction - mass plug). Valor supuesto.
n=1.55*10^5; % Canales por metro cuadrado; Para este tipo es consistente con el
valor 100
end

if Tipo_m==3
% Tipo 3 (RC 200/12)
dh=0.0015; % Dimensión canal (lado)
ht=0.000304; % Espesor canal (pared porosa)
sigmaw=25*10^-13; % Permeabilidad (pared porosa)
lX=0.005; % Longitud de extremos (end correction - mass plug). Valor supuesto.
n=3.87*10^5; % Canales por metro cuadrado; Para este tipo NO es consistente con
el valor 200
end

if Tipo_m==4

```

```

% Tipo 4 (RC 200/20)
dh=0.0013; % Dimensión canal (lado)
ht=0.000508; % Espesor canal (pared porosa)
sigmaw=25*10^-13; % Permeabilidad (pared porosa)
lX=0.005; % Longitud de extremos (end correction - mass plug). Valor supuesto.
n=2.48*10^5; % Canales por metro cuadrado; Para este tipo NO es consistente con
el valor 200
end

Nt=n*Am; % Canales totales;
N=Nt/2; % Canales abiertos en cada lado

% Presencia de hollín
hollin=variab(10);
if hollin==0
    Rw=mu*(ht/sigmaw); % Resistencia de pared (a partir de ley de Darcy)
end

if hollin==1
    h_soot=ht/10; % Espesor de capa de hollín
    sigma_soot=1.5*10^-14; % Permeabilidad de capa de hollín
    Rw=mu*(ht/sigmaw+h_soot/sigma_soot); % Resistencia de pared (a partir de ley de
Darcy)
end

% Cambio de sección de cámara central izquierda a DPF
m_IN=(N*dh^2)/Am;

% Cambio de sección de DPF a cámara central derecha
m_OUT=m_IN;
M_OUT=M_IN; % Número de Mach en cámara contigua al monolito, salida

% Condiciones de conservación de energía y momento
Z_IN=Z0ini/Am;
Z_OUT=Z_IN;
% Término resistivo
r_IN=Z_IN*M_IN*(1/m_IN^2-1);
r_OUT=2*Z_OUT*M_OUT*(1-1/m_OUT);

% Resultados analíticos de Allam y Abom (ecuación 23, JSV 2005 DPF)
% Vectores propios sin flujo
e1=[1;1];
e2=e1;
e3=[1;-1];
e4=e3;

```

%monolito_3

```
% Propiedades de monolito de DPF en función de la frecuencia
% Código extraído de la rutina de ajuste modal con monolito (modelo 3D/1D).
%
=====
==

% Barrido en frecuencia
% =====

caire=c0ini;
rhoaire=rho0ini;

Lm=lc; % Longitud del monolito

NB=(ffin-fini)/deltaf+1;

for nf=1:NB

    frec=deltaf*(nf-1)+fini;
    w=2*pi*frec;
    'Frecuencia ='
    frec
    kaire=w/caire; % Número de onda del aire

    % ---- Caracterización del monolito. Allam y Abom (Kirchhoff)

    % Modelo de Kirchhoff (ver artículo con modificaciones JSV 2006 de Sabry Allam y
    Mats Abom)
    s=dh/2*sqrt(rho0ini*w/mu); % Número de onda de cortadura. El valor dh/2 no está
    claro pero da bien.
    psi=sqrt(prandtl);

    Fs=2/(s*sqrt(-1i))*besselj(1,s*sqrt(-1i))/besselj(0,s*sqrt(-1i));
    FPs=2/(psi*s*sqrt(-1i))*besselj(1,psi*s*sqrt(-1i))/besselj(0,psi*s*sqrt(-1i));

    c0=c0ini*sqrt(1-Fs)/sqrt(1+(gamma-1)*FPs); % Velocidad en los capilares
    rho0=rho0ini/(1-Fs); % Densidad en los capilares

    B=c0*rho0/(dh*Rw);

    k0=w/c0;
    k0prima=k0;
    Z0=rho0*c0;

    K1=k0;
```

```

K2=-K1;
K3=k0*sqrt(1-8i*B/k0);
K4=-K3;
e1prima=e1*dh^2/(Z0*k0prima/K1); % Igual a e1prima=e1*dh^2/Z0
e2prima=e2*dh^2/(Z0*k0prima/K2); % Igual a e2prima=-e2*dh^2/Z0. Cambio de
signo de velocidad, onda regresiva
e3prima=e3*dh^2/(Z0*k0prima/K3); % Atención a la definición de impedancia Z
para los modos atenuados 3 y 4
e4prima=e4*dh^2/(Z0*k0prima/K4); % Atención a la definición de impedancia Z
para los modos atenuados 3 y 4
H0=[e1 e2 e3 e4;e1prima e2prima e3prima e4prima]; % Matriz H0 de ecuación 20
HL=[e1*exp(-1i*K1*Lm) e2*exp(-1i*K2*Lm) e3*exp(-1i*K3*Lm) e4*exp(-
1i*K4*Lm);e1prima*exp(-1i*K1*Lm) e2prima*exp(-1i*K2*Lm) e3prima*exp(-
1i*K3*Lm) e4prima*exp(-1i*K4*Lm)]; % Matriz HL de ecuación 20
S=H0*inv(HL); % Matriz S
T=[S(1,2)-S(4,2)*S(1,1)/S(4,1) S(1,4)-S(4,4)*S(1,1)/S(4,1);S(3,2)-S(4,2)*S(3,1)/S(4,1)
S(3,4)-S(4,4)*S(3,1)/S(4,1)]; % Matriz T para presión y flujo volumétrico. Ecuación 21.
TII=[T(1,1) T(1,2)/N;N*T(2,1) T(2,2)]; % Matriz T para presión y flujo volumétrico con
todos los canales abiertos de un lado. Ecuación 22.

TI_plug=[1 r_IN+1i*rho0ini*w*IX/(N*dh^2);0 1]; % Conservación de energía
TIII_plug=[1 r_OUT+1i*rho0ini*w*IX/(N*dh^2);0 1]; % Conservación de momento

T_v_f_IN=[1 0;0 1/Am]; % Cambio velocidad/flujo volumétrico
T_v_f_OUT=[1 0;0 Am]; % Cambio velocidad/flujo volumetrico

TDPF=T_v_f_IN*TI_plug*TII*TIII_plug*T_v_f_OUT; % Matrices
T_v_f_IN*TI(plug)*TII*TIII(plug)*T_v_f_OUT

% Conductos de entrada, salida y contiguos a DPF

% ---- Cuatro polos de la matriz de transferencia para conectar las dos caras del
monolito

T11=TDPF(1,1);
T12=TDPF(1,2);
T21=TDPF(2,1);
T22=TDPF(2,2);

% ---- Cálculo de matriz de admitancia
%
% u1=T21*p2+T22*u2=T22/T12*p1+(T21-T22*T11/T12)*p2
% u2=p1/T12-T11/T12*p2
% u2=(-1/T12)*p1+(T11/T12)*p2 % Cambio de signo

y11r=real(T22/T12);
y11i=imag(T22/T12);

```

```

y12r=real(T21-T22*T11/T12);
y12i=imag(T21-T22*T11/T12);
y21r=real(-1/T12);
y21i=imag(-1/T12);
y22r=real(T11/T12);
y22i=imag(T11/T12);

% Escritura de fichero para Ansys
%
% tb,perf,2,,,ymat
% tbfield,freq,frequ
% tldata,1,y11r,y11i,y12r,y12i,y21r,y21i
% tldata,7,y22r,y22i
%

fprintf(monolito,'%s','tbfield,freq,');
fprintf(monolito,'%i\r\n',freq);
fprintf(monolito,'%s','tldata,1,');
fprintf(monolito,'%10e',y11r); fprintf(monolito,'%s','');
fprintf(monolito,'%10e',y11i); fprintf(monolito,'%s','');
fprintf(monolito,'%10e',y12r); fprintf(monolito,'%s','');
fprintf(monolito,'%10e',y12i); fprintf(monolito,'%s','');
fprintf(monolito,'%10e',y21r); fprintf(monolito,'%s','');
fprintf(monolito,'%10e\r\n',y21i);
% Continúa
fprintf(monolito,'%s','tldata,7,');
fprintf(monolito,'%10e',y22r); fprintf(monolito,'%s','');
fprintf(monolito,'%10e\r\n',y22i);

end % Fin del barrido en frecuencia

```

10.3. ANEXO 3: MACRO DE APDL PARA LA GEOMETRÍA CENTRADA

```
! *****
!  
! Geometría de sección transversal circular  
! Conductos concéntricos  
! Problema axisimétrico; se modela 1/4 de la geometría  
!  
! *****  
/title, Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador/Trampa de Partículas  
/PREP7  
/view,1,1,1,1  
rho=1.225          ! Densidad del aire (debe ser consistente con los datos utilizados  
en los monolitos)  
c0=340.255        ! Velocidad del sonido (debe ser consistente con los datos  
utilizados en los monolitos)  
z0=rho*c0         ! Impedancia característica del aire (se utiliza para imponer  
impedancia anecoica)  
f_fin=3000        ! Máxima frecuencia de cálculo  
f_ini=10          ! Frecuencia inicial (la final ya está arriba)  
deltaf=10         ! Incremento de frecuencia  
Nfrec=(f_fin-f_ini)/deltaf+1 ! Número de frecuencias de cálculo  
lambda_min=c0/f_fin ! Mínima longitud de onda a la máxima frecuencia  
p=1              ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor. Lo  
hace bien igualmente.  
vn=-p/(rho*c0)   ! Velocidad normal de excitación  
                ! Definición de elementos y materiales  
et,1,183         ! Cuadrilátero cuadrático estructural 2D (solamente para mallar  
secciones transversales y extruir)  
et,2,220,,1      ! Hexaedro acústico de 20 nodos (interpolación cuadrática)  
mp,dens,1,rho    ! Material (regiones de aire)  
mp,sonc,1,c0  
!  
! ***** CATALIZADOR *****  
! Cálculo de propiedades de monolito de catalizador (modelo de Allard)  
! Se lee la matriz de transferencia (calculada con Matlab como matriz de admitancias)  
para reemplazar monolito de catalizador  
! En Matlab se deben utilizar las mismas propiedades, datos, frecuencias, etc. que en el  
cálculo armónico de Ansys  
!  
! El modelo de matriz de transferencia en Ansys solamente admite hexaedros y  
prismas  
mp,dens,2,rho    ! Aire en los capilares  
mp,sonc,2,c0  
!  
tb,perf,2,,,ymat ! Matriz de admitancias  
!
```

```

/INPUT,'matriz_cc','txt' ! Lectura de fichero creado por Matlab
!
! *****
!
! ***** TRAMPA (DPF) *****
! Cálculo de propiedades de monolito de DPF (modelo de Sabry Allam y Mats Abom,
Journal of Sound and Vibration, 2005 y 2006)
! Se lee la matriz de transferencia (calculada con Matlab como matriz de admitancias)
para reemplazar monolito de DPF
! En Matlab se deben utilizar las mismas propiedades, datos, frecuencias, etc. que en el
cálculo armónico de Ansys
!
! El modelo de matriz de transferencia en Ansys solamente admite hexaedros y
prismas
mp,dens,3,rho ! Aire en los capilares
mp,sonc,3,c0
!
tb,perf,3,,ymat ! Matriz de admitancias
!
/INPUT,'matriz_dpff','txt' ! Lectura de fichero creado por Matlab
!
! *****
! Creación de modelo sólido
rinlet=0.0258 ! Conducto de entrada
linlet=0.1
! Cámaras de expansión, monolitos y contracción
rchamb=0.1275 ! Radio de sección circular

lchamb1=0.0475
lmonolit_cc=0.075 ! Catalizador, longitud ficticia, se reemplaza por matriz
lchamb2=0.0475
lmonolit_dpff=0.175 ! Trampa de partículas, longitud ficticia, se reemplaza por
matriz
lchamb3=0.0475

routlet=0.0258
loutlet=0.1
!
! Secciones transversales
!
! Keypoints
distancia=0.1 ! Distancia a origen de áreas transversales para posterior
extrusión (para evitar solapes)
!
k,1,,-distancia
k,2,rinlet,,-distancia
k,3,rchamb,,-distancia

```

```

k,4,,rchamb,-distancia
k,5,,rinlet,-distancia
!
! Líneas
!
l,1,2
l,2,3
larc,3,4,1,rchamb
l,4,5
l,5,1
larc,2,5,1,rinlet
!
! Áreas: entrada y salida
!
al,1,6,5
!
! Área: cámara
!
al,2,3,4,6
!
type,1
mat,1
!
! Mallado de geometría transversal
h=lambda_min/10 ! 10 elementos por (mínima) longitud de onda (refinar para
obtener mayor precisión)
esize,h
amesh,all
!
! Copia de áreas para extrusión posterior
agen,2,1,,,,distancia
agen,2,1,2,1,,,distancia+linlet
agen,2,1,2,1,,,distancia+linlet+lchamb1
agen,2,1,2,1,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit_cc
agen,2,1,2,1,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2
agen,2,1,2,1,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2+lmonolit_dpf
agen,2,1,,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2+lmonolit_dpf+lchamb3
!
! Extrusión
type,2 ! Elemento acústico 220 en toda la malla
mat,1
!
extopt,esize,linlet*100 ! Conducto de entrada
extopt,aclear,1
VEXT,3,,,,linlet
!
extopt,esize,lchamb1*100 ! Cámara 1
extopt,aclear,1

```

```

VEXT,4,5,1,,,lchamb1

mat,2
extopt,esize,1      ! Monolito de catalizador - CC
extopt,aclear,1
VEXT,6,7,1,,,lmonolit_cc

mat,1
extopt,esize,lchamb2*100  ! Cámara 2
extopt,aclear,1
VEXT,8,9,1,,,lchamb2

mat,3
extopt,esize,1      ! Monolito de trampa de partículas - DPF
extopt,aclear,1
VEXT,10,11,1,,,lmonolit_dpf

mat,1
extopt,esize,lchamb3*100  ! Cámara 3
extopt,aclear,1
VEXT,12,13,1,,,lchamb3

extopt,esize,loutlet*100  ! Conducto de salida
extopt,aclear,1
VEXT,14,,,,,loutlet

aclear,1,2,1      ! Borrado de resto de malla con elemento 183
adel,1,2,1,1      ! Borrado de resto de áreas, líneas y keypoints utilizadas en
extrusión

nummrg,all      ! Fusión de entidades solapadas y compresión de numeración
numcmp,all
eplot
!
! ***** CATALIZADOR *****
!
! Monolito. Definición de puertos para conexión con matriz de
admitancia
esel,s,mat,,2
nsle,s
nsel,s,loc,z,linlet+lchamb1
sf,all,port,3      ! Puerto de entrada al monolito
nsel,s,loc,z,linlet+lchamb1+lmonolit_cc
sf,all,port,4      ! Puerto de salida del monolito
alls
!
! ***** TRAMPA (DPF) *****

```

```

! Monolito. Definición de puertos para conexión con matriz de
admitancia
esel,s,mat,,3
nsle,s
nset,s,loc,z,linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2
sf,all,port,5      ! Puerto de entrada al monolito
nset,s,loc,z,linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2+lmonolit_dpf
sf,all,port,6      ! Puerto de salida del monolito
alls
!
! *****
!
nset,s,loc,z,0      ! Nodos en la sección de entrada
sf,all,port,1      ! Puerto de entrada del dispositivo postratamiento
catalizador/trampa de partículas
!
! Las dos siguientes líneas permiten que se aplique una velocidad cuya parte progresiva
! tiene asociada la presión p definida arriba. Si no se hace así no funciona.
!
sf,all,shld,vn      ! Velocidad normal de excitación
sf,all,impd,z0      ! Condición de impedancia en la entrada
!
nset,s,loc,z,linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2+lmonolit_dpf+lchamb3+loutlet
! Nodos en la sección de salida
sf,all,port,2      ! Puerto de salida del catalizador
sf,all,inf          ! Radiación en la salida. Impedancia anecoica en la salida (no vuelve
energía al dispositivo postratamiento catalizador/trampa de partículas)
alls
fini
! Cálculo de solución
/solu
antype,harmic
hropt,auto
kbc,1
harf,0,f_fin
nsub,Nfrec          ! Frecuencias de cálculo especificadas al inicio
solve
finish
! post-processing
/post1
spower,1,2          ! Cálculo de potencia sonora (puertos 1 y 2: entrada y salida del
dispositivo postratamiento catalizador/trampa de partículas)
plst,CAT_DPF_transfer_cir0102,a2p,tl ! TL - pérdida de transmisión
fini

```

10.4. ANEXO 4: MACRO DE APDL PARA LA GEOMETRÍA DESCENTRADA

```

! *****
!
! Geometría de sección transversal circular
! Conductos descentrados (salida)
! Problema con un plano de simetría; se modela 1/2 de la geometría
!
! *****
/title, Pérdida de Transmisión (dB) de Catalizador/Trampa de Partículas
/PREP7
/view,1,1,1,1
rho=1.225          ! Densidad del aire (debe ser consistente con los datos utilizados
en los monolitos)
c0=340.255        ! Velocidad del sonido (debe ser consistente con los datos
utilizados en los monolitos)
z0=rho*c0         ! Impedancia característica del aire (se utiliza para imponer
impedancia anecoica)
f_fin=3000        ! Máxima frecuencia de cálculo)
f_ini=10          ! Frecuencia inicial (la final ya está arriba)
deltaf=10         ! Incremento de frecuencia
Nfrec=(f_fin-f_ini)/deltaf+1 ! Número de frecuencias de cálculo
lambda_min=c0/f_fin ! Mínima longitud de onda a la máxima frecuencia
p=1              ! Excitación en sección de entrada. Se puede poner otro valor. Lo
hace bien igualmente.
vn=-p/(rho*c0)   ! Velocidad normal de excitación
                ! Definición de elementos y materiales
et,1,183         ! Cuadrilátero cuadrático estructural 2D (solamente para mallar
secciones transversales y extruir)
et,2,220,,1     ! Hexaedro acústico de 20 nodos (interpolación cuadrática)
mp,dens,1,rho   ! Material (regiones de aire)
mp,sonc,1,c0
!
! ***** CATALIZADOR *****
! Cálculo de propiedades de monolito de catalizador (modelo de Allard)
! Se lee la matriz de transferencia (calculada con Matlab como matriz de admitancias)
para reemplazar monolito de catalizador
! En Matlab se deben utilizar las mismas propiedades, datos, frecuencias, etc. que en el
cálculo armónico de Ansys
!
! El modelo de matriz de transferencia en Ansys solamente admite hexaedros y
prismas
mp,dens,2,rho   ! Aire en los capilares
mp,sonc,2,c0
!

```

```

tb,perf,2,,ymat      ! Matriz de admitancias
!
/INPUT,'matriz_cc','txt' ! Lectura de fichero creado por Matlab
!
! *****
!
! ***** TRAMPA (DPF) *****
! Cálculo de propiedades de monolito de DPF (modelo de Sabry Allam y Mats Abom,
Journal of Sound and Vibration, 2005 y 2006)
! Se lee la matriz de transferencia (calculada con Matlab como matriz de admitancias)
para reemplazar monolito de DPF
! En Matlab se deben utilizar las mismas propiedades, datos, frecuencias, etc. que en el
cálculo armónico de Ansys
!
! El modelo de matriz de transferencia en Ansys solamente admite hexaedros y
prismas
mp,dens,3,rho      ! Aire en los capilares
mp,sonc,3,c0
!
tb,perf,3,,ymat      ! Matriz de admitancias
!
/INPUT,'matriz_dpf','txt' ! Lectura de fichero creado por Matlab
!
! *****
!
! Creación de modelo sólido
rinlet=0.0258      ! Conducto de entrada
linlet=0.1
!
! Cámaras de expansión, monolitos y contracción
rchamb=0.1275      ! Radio de sección circular
!
lchamb1=0.0475
lmonolit_cc=0.075      ! Catalizador, longitud ficticia, se reemplaza por matriz
lchamb2=0.0475
lmonolit_dpf=0.175      ! Trampa de partículas, longitud ficticia, se reemplaza por
matriz
lchamb3=0.0475
!
! Conducto de salida
routlet=0.0258
loutlet=0.1
offset=0.08
!
! Secciones transversales
!
! Keypoints
distancia=0.1      ! Distancia a origen de áreas transversales para posterior
extrusión (para evitar solapes)
!

```

```
k,1,,,-distancia
k,2,rinlet,,-distancia
k,3,rchamb,,-distancia
k,4,,rchamb,-distancia
k,5,,rinlet,-distancia
k,6,,-rinlet,-distancia
k,7,,-(offset-routlet),-distancia
k,8,,-offset,-distancia
k,9,,-(offset+routlet),-distancia
k,10,routlet,-offset,-distancia
k,11,,-rchamb,-distancia
!
! Líneas
!
l,1,2
l,2,3
larc,3,4,1,rchamb
l,4,5
l,5,1
larc,2,5,1,rinlet
l,1,6
larc,6,2,1,rinlet
l,6,7
l,7,8
l,8,9
l,8,10
larc,9,10,8,routlet
larc,10,7,8,routlet
l,9,11
larc,11,3,1,rchamb
!
! Áreas: entrada
!
al,1,6,5
al,1,7,8
!
! Áreas: salida
!
al,10,12,14
al,11,13,12
!
! Áreas: cámara
!
al,2,3,4,6
al,2,8,9,14,13,15,16
!
!
```

```

type,1
mat,1
! Mallado de geometría transversal
h=lambda_min/10 ! 10 elementos por (mínima) longitud de onda (refinar para
obtener mayor precisión)
esize,h
amesh,all
!
! Copia de áreas para extrusión posterior
agen,2,1,2,1,,,distancia
agen,2,1,6,1,,,distancia+linlet
agen,2,1,6,1,,,distancia+linlet+lchamb1
agen,2,1,6,1,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit_cc
agen,2,1,6,1,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2
agen,2,1,6,1,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2+lmonolit_dpf
agen,2,3,4,1,,,distancia+linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2+lmonolit_dpf+lchamb3
!
! Extrusión
type,2 ! Elemento acústico 220 en toda la malla
mat,1
!
extopt,esize,linlet*100 ! Conducto de entrada
extopt,aclear,1
VEXT,7,8,1,,,linlet

extopt,esize,lchamb1*100 ! Cámara 1
extopt,aclear,1
VEXT,9,14,1,,,lchamb1

mat,2
extopt,esize,1 ! Monolito de catalizador - CC
extopt,aclear,1
VEXT,15,20,1,,,lmonolit_cc

mat,1
extopt,esize,lchamb2*100 ! Cámara 2
extopt,aclear,1
VEXT,21,26,1,,,lchamb2

mat,3
extopt,esize,1 ! Monolito de trampa de partículas - DPF
extopt,aclear,1
VEXT,27,32,1,,,lmonolit_dpf

mat,1
extopt,esize,lchamb3*100 ! Cámara 3
extopt,aclear,1

```

```

VEXT,33,38,1,,,lchamb3

extopt,esize,loutlet*100  ! Conducto de salida
extopt,aclear,1
VEXT,39,40,1,,,loutlet

aclear,1,6,1          ! Borrado de resto de malla con elemento 183
adel,1,6,1,1         ! Borrado de resto de áreas, líneas y keypoints utilizadas en
extrusión

nummrg,all
numcmp,all
eplot
!
! ***** CATALIZADOR *****
!                               ! Monolito. Definición de puertos para conexión con matriz de
admitancia
esel,s,mat,,2
nsle,s
nset,s,loc,z,linlet+lchamb1
sf,all,port,3        ! Puerto de entrada al monolito
nset,s,loc,z,linlet+lchamb1+lmonolit_cc
sf,all,port,4        ! Puerto de salida del monolito
alls
!
! ***** TRAMPA (DPF) *****
!                               ! Monolito. Definición de puertos para conexión con matriz de
admitancia
esel,s,mat,,3
nsle,s
nset,s,loc,z,linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2
sf,all,port,5        ! Puerto de entrada al monolito
nset,s,loc,z,linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2+lmonolit_dpf
sf,all,port,6        ! Puerto de salida del monolito
alls
!
! *****
!
nset,s,loc,z,0        ! Nodos en la sección de entrada
sf,all,port,1        ! Puerto de entrada del dispositivo postratamiento
catalizador/trampa de partículas
!
! Las dos siguientes líneas permiten que se aplique una velocidad cuya parte progresiva
! tiene asociada la presión p definida arriba. Si no se hace así no funciona.
!
sf,all,shld,vn        ! Velocidad normal de excitación
sf,all,impd,z0        ! Condición de impedancia en la entrada

```

```

!
nset,s,loc,z,linlet+lchamb1+lmonolit_cc+lchamb2+lmonolit_dpf+lchamb3+loutlet
      ! Nodos en la sección de salida
sf,all,port,2      ! Puerto de salida del catalizador
sf,all,inf        ! Radiación en la salida. Impedancia anecoica en la salida (no vuelve
energía al dispositivo postratamiento catalizador/trampa de partículas)
alls
fini
      ! Cálculo de solución
/solu
antype,harmic
hropt,auto
kbc,1
harf,0,f_fin
nsub,Nfrec        ! Frecuencias de cálculo especificadas al inicio
solve
finish
! post-processing
/post1
spower,1,2        ! Cálculo de potencia sonora (puertos 1 y 2: entrada y salida del
dispositivo postratamiento catalizador/trampa de partículas)
plst,CAT_DPF_transfer_cir_offset0102,a2p,tl  ! TL - pérdida de transmisión
fini

```